



BIOLOGI PERIKANAN



Burhanis, Edwarsyah, Alaudin, Zulfadhli
Radhi Fadhillah, Roni Arif Munandar

DUMMY

**Burhanis, Edwarsyah, Alaudin, Zulfadhli,
Radhi Fadhillah, Roni Arif Munandar**

BIOLOGI PERIKANAN

Diterbitkan Oleh:



PT. Samudra Solusi Profesional

Biologi Perikanan

Copyright ©2025

Penulis

Burhanis
Edwarsyah
Alaudin
Zulfadhli
Radhi Fadhillah
Roni Arif Munandar

Editor: Abdul Gafur Rinaldi, S.Ak., M.Sc., CTT., BKP.

Layouter: Shanty Dwi Rachmawati

Desain Cover: La_Chus99

Diterbitkan Oleh:



Anggota IKAPI
No. Registrasi Keanggotaan: 385/JTI/2023

Kantor Pusat

Bukit Cemara Tidar Blok K1 No. 14
Desa/Kelurahan Karangbesuki, Kec. Sukun,
Kota Malang, Jawa Timur
Telp/Fax: 0822-3118-6542
Email: samudrasolusiprofesional@gmail.com

Kantor Cabang

- Workshop Jasmine, Jasmine Valley Blok 3 No. 2, Araya, Malang
- Jalan Magelang, No. 118 Karangwaru, Tegalrejo, D.I Yogyakarta

Cetakan Pertama, Agustus 2025

ISBN: Dalam proses pengajuan

Dilarang keras mengutip, menjiplak, atau memfotokopi baik sebagian atau seluruh isi buku ini, serta menjual belikannya tanpa mendapat izin tertulis dari penerbit.

Kata Pengantar

Dengan mengucapkan syukur ke hadirat Allah SWT, buku referensi yang berjudul "Biologi Perikanan" akhirnya dapat diselesaikan dan disusun sebagai bagian dari kontribusi keilmuan dalam pengembangan pendidikan tinggi, riset, dan pengelolaan sumber daya perikanan di Indonesia.

Buku ini dirancang sebagai referensi komprehensif yang mengintegrasikan prinsip-prinsip dasar hingga konsep lanjutan dalam ilmu biologi perikanan. Materi disusun secara sistematis dan mendalam, mencakup aspek taksonomi, morfologi, fisiologi, reproduksi, pertumbuhan, kebiasaan makan, ruaya, identifikasi stok, hingga dinamika populasi dan pendekatan manajemen berbasis biologi. Selain itu, setiap topik dikontekstualisasikan dengan realitas perikanan di Indonesia, termasuk tantangan pengelolaan pada perikanan pelagis kecil, demersal, dan dampak perubahan iklim.

Sebagai ilmu multidisipliner terapan, biologi perikanan memainkan peran sentral dalam menyediakan landasan ilmiah bagi kebijakan, konservasi, dan praktik perikanan berkelanjutan. Oleh karena itu, buku ini ditujukan tidak hanya bagi mahasiswa di jenjang sarjana dan pascasarjana, tetapi juga bagi dosen, peneliti, penyuluh perikanan, serta pemangku kepentingan di bidang pengelolaan sumber daya perairan.

Penulisan buku ini merupakan hasil kerja kolektif para akademisi dari berbagai latar belakang ilmu kelautan dan perikanan, yang disatukan oleh komitmen untuk menghadirkan bahan ajar yang tidak hanya informatif tetapi juga aplikatif dan kontekstual. Kami berharap kehadiran buku ini dapat memperkuat literasi ilmiah, mendorong pembelajaran yang kritis, serta menginspirasi penelitian lebih lanjut dalam bidang biologi perikanan dan pengelolaan sumber daya hayati perairan.

Kami menyadari bahwa buku ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, kami sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan edisi berikutnya. Harapan kami, buku ini dapat menjadi salah satu referensi penting dalam memperkuat fondasi ilmu biologi perikanan di Indonesia dan menjadi inspirasi bagi upaya-upaya pengelolaan perikanan yang lebih berkelanjutan dan berbasis sains.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan moral, akademik, dan teknis dalam penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat menjadi sumbangan berarti bagi pengembangan ilmu dan praktik pengelolaan perikanan yang berkelanjutan di Indonesia.

Malang, Agustus 2025

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	v

BAB 1

PENDAHULUAN: MEMAHAMI BIOLOGI PERIKANAN	1
A. Definisi, Konsep, dan Ruang Lingkup Biologi Perikanan.....	1
B. Sejarah dan Evolusi Paradigma dalam Biologi Perikanan	7
C. Peran Vital Biologi Perikanan dalam Pengelolaan Sumber Daya Ikan Berkelanjutan.....	12

BAB 2

IKTIOLOGI TERAPAN UNTUK BIOLOGI PERIKANAN	19
A. Morfologi dan Morfometrik Ikan	19
B. Anatomi dan Fisiologi Fungsional.....	25
C. Taksonomi dan Klasifikasi Ikan Ekonomis Penting Indonesia ...	34

BAB 3

BIOLOGI REPRODUKSI IKAN	40
A. Organ Reproduksi, Gametogenesis, dan Diferensiasi Seksual..	41
B. Analisis Kematangan Gonad.....	44
C. Fekunditas, Diameter Telur, dan Tipe Pemijahan (<i>Spawning</i>)....	50

BAB 4

UMUR DAN PERTUMBUHAN IKAN.....	57
A. Metode Penentuan Umur Ikan.....	58
B. Analisis Pertumbuhan Ikan.....	78

BAB 5

KEBIASAAN MAKANAN IKAN (FOOD HABITS)	101
A. Metode Analisis Isi Lambung dan Usus.....	102
B. Indeks Pilihan Makanan (<i>Index of Preponderance</i>).....	108
C. Tingkat Trofik dan Hubungan Makanan di Ekosistem Perairan	114
D. Implikasi Studi Kebiasaan Makanan dalam Pengelolaan.....	117

BAB 6

RUAYA (MIGRASI) DAN TINGKAH LAKU IKAN.....	120
A. Definisi, Pola, dan Jenis-jenis Ruaya.....	121
B. Faktor Pemicu dan Mekanisme Orientasi Ruaya	128
C. Tingkah Laku Menggerombol (<i>Schooling</i>) dan Implikasinya pada Perikanan	135

BAB 7

IDENTIFIKASI STOK IKAN.....	141
A. Konsep Stok atau Populasi dalam Perikanan.....	142
B. Metode Identifikasi Stok.....	148
C. Konsep Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP-RI) di Indonesia	161

BAB 8

MORTALITAS POPULASI IKAN.....	165
A. Konsep Mortalitas	166
B. Metode Pendugaan Mortalitas Alami (M).....	168
C. Metode Pendugaan Mortalitas Total (Z) dan Mortalitas Penangkapan (F)	177

BAB 9

REKRUTMEN DAN DINAMIKA POPULASI.....	185
A. Definisi Rekrutmen dalam Konteks Perikanan	186
B. Hubungan Stok dan Rekrutmen (<i>Stock-Recruitment Relationship</i>).....	189
C. Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Keberhasilan Rekrutmen	198

BAB 10

PENDUGAAN STOK (<i>STOCK ASSESSMENT</i>)	203
A. Tujuan dan Prinsip Dasar Pendugaan Stok	204
B. Model Produksi Surplus (Model Holistik).....	208
C. Pengantar Model Analitik.....	215

BAB 11

MANAJEMEN PERIKANAN BERBASIS BIOLOGI.....	225
A. Tujuan Pengelolaan Perikanan	226
B. Perangkat Manajemen Perikanan (Management Tools).....	231
C. Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (EAFM)..	255

BAB 12

STUDI KASUS DAN APLIKASI DI INDONESIA	259
A. Studi Kasus Perikanan Pelagis Kecil (Ccontoh: Ikan Lemuru di Selat Bali).....	260
B. Studi Kasus Perikanan Demersal (Ccontoh: Perikanan Kakap dan Kerapu)	263
C. Tantangan dan Masa Depan Biologi Perikanan di Indonesia....	268
Glosarium.....	275
Daftar Pustaka.....	279
Biodata Penulis.....	282

DUMMMY

A. Definisi, Konsep, dan Ruang Lingkup Biologi Perikanan

Biologi perikanan merupakan cabang ilmu terapan yang secara spesifik memfokuskan kajiannya pada biologi populasi ikan dan biota akuatik lainnya yang memiliki nilai ekonomis atau ekologis penting, dengan tujuan utama untuk menyediakan dasar ilmiah yang kuat bagi eksploitasi dan pengelolaan sumber daya tersebut secara rasional dan berkelanjutan. Berbeda dengan ilmu biologi murni yang berupaya memahami organisme untuk kepentingan ilmu itu sendiri, biologi perikanan memiliki orientasi yang jelas pada aplikasi. Ia adalah jembatan yang menghubungkan pemahaman fundamental tentang siklus hidup, perilaku, dan dinamika populasi ikan dengan kebutuhan praktis dalam dunia perikanan, yaitu bagaimana memanfaatkan sumber daya hayati perairan secara optimal tanpa membahayakan kelestariannya untuk generasi mendatang (King, 2007).

Pada intinya, biologi perikanan berupaya menjawab serangkaian pertanyaan krusial yang menjadi tulang punggung pengelolaan perikanan. Pertanyaan-pertanyaan ini meliputi: Berapa banyak ikan yang ada di suatu perairan (estimasi kelimpahan)? Seberapa cepat mereka tumbuh dan mencapai ukuran layak tangkap (pertumbuhan)? Kapan dan di mana mereka bereproduksi (reproduksi)? Apa yang mereka makan dan bagaimana posisi mereka dalam jaring-jaring makanan (ekologi trofik)? Seberapa besar laju kematian alami dan kematian akibat penangkapan (mortalitas)? Dan yang terpenting, berapa banyak ikan yang dapat diambil dari populasi setiap tahunnya tanpa menyebabkan penurunan stok yang tidak dapat pulih (hasil tangkapan lestari)? (Hilborn & Walters, 1992).

Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut, ruang lingkup biologi perikanan menjadi sangat luas. Ia tidak hanya mempelajari ikan

sebagai individu, tetapi juga sebagai bagian dari unit yang lebih besar yang disebut populasi atau stok. Stok inilah yang menjadi unit dasar dalam analisis dan pengelolaan perikanan. Oleh karena itu, disiplin ini mencakup studi mendalam mengenai aspek-aspek biologi yang memengaruhi nasib suatu populasi, seperti reproduksi, pertumbuhan, kebiasaan makan, dan mortalitas. Selain itu, biologi perikanan juga harus mempertimbangkan interaksi stok tersebut dengan lingkungannya, baik lingkungan biotik (predator, mangsa, kompetitor) maupun abiotik (suhu, salinitas, arus, kualitas air), serta dampaknya terhadap dinamika populasi. Kompleksitas inilah yang menjadikan biologi perikanan sebagai sebuah ilmu yang dinamis dan penuh tantangan.

1. Biologi Perikanan sebagai Ilmu Multidisiplin Terapan

Karakteristik utama yang mendefinisikan biologi perikanan adalah sifatnya yang interdisipliner dan multidisipliner. Ia tidak berdiri sendiri sebagai sebuah disiplin tunggal, melainkan secara aktif meminjam, mengadaptasi, dan mengintegrasikan konsep, teori, serta metodologi dari berbagai cabang ilmu lainnya untuk mencapai tujuannya. Ketergantungan pada disiplin lain ini bukanlah sebuah kelemahan, melainkan kekuatan yang memungkinkan biologi perikanan untuk menganalisis masalah yang kompleks dari berbagai sudut pandang dan menghasilkan solusi yang lebih holistik dan komprehensif.

Fondasi utama dari biologi perikanan adalah iktiologi, yaitu studi tentang ikan. Pengetahuan dasar mengenai taksonomi (klasifikasi), morfologi (bentuk luar), anatomi (struktur dalam), dan fisiologi (fungsi tubuh) ikan yang disediakan oleh iktiologi adalah prasyarat mutlak. Tanpa kemampuan untuk mengidentifikasi spesies dengan benar, memahami bagaimana organ-organ internalnya berfungsi, atau mengaitkan bentuk tubuhnya dengan habitatnya, analisis biologi perikanan yang lebih lanjut tidak mungkin dilakukan (Wootton & Smith, 2015).

Selanjutnya, ekologi memberikan kerangka kerja konseptual untuk memahami interaksi antara ikan, populasinya, dan lingkungan sekitarnya. Konsep-konsep ekologi seperti relung (*niche*), jaring-jaring makanan, dinamika predator-mangsa, dan suksesi ekologis sangat relevan. Biologi

perikanan secara esensial adalah cabang dari ekologi populasi yang diterapkan pada spesies target penangkapan. Ia menggunakan prinsip-prinsip ekologi untuk memahami bagaimana faktor-faktor seperti ketersediaan makanan atau tekanan predasi dapat mempengaruhi laju pertumbuhan dan mortalitas alami suatu stok ikan.

Disiplin lain yang berkontribusi secara signifikan adalah oseanografi dan limnologi. Ilmu-ilmu ini mempelajari karakteristik fisika, kimia, dan biologi dari ekosistem laut dan perairan tawar. Data mengenai suhu permukaan laut, pola arus, tingkat salinitas, konsentrasi klorofil-a, dan siklus nutrisi sangat vital bagi biologi perikanan. Variasi parameter lingkungan ini sering kali menjadi pendorong utama dari variabilitas dalam kelangsungan hidup larva, laju pertumbuhan, pola migrasi, dan pada akhirnya, kelimpahan stok ikan dari tahun ke tahun (Jennings, Kaiser, & Reynolds, 2001).

Selain ilmu-ilmu alam, biologi perikanan modern juga semakin terintegrasi dengan disiplin lain. Genetika populasi digunakan untuk mengidentifikasi unit stok yang berbeda, yang secara genetik terisolasi satu sama lain, sebuah informasi krusial untuk pengelolaan spasial. Matematika dan statistika adalah tulang punggung dari analisis kuantitatif, menyediakan alat untuk pemodelan pertumbuhan, mortalitas, dan dinamika populasi. Bahkan, ilmu sosial dan ekonomi menjadi semakin penting untuk memahami perilaku nelayan sebagai respons terhadap regulasi dan kondisi sumber daya, yang pada gilirannya menciptakan umpan balik yang mempengaruhi populasi ikan itu sendiri.

Sifat multidisipliner ini secara langsung mengarah pada karakter biologi perikanan sebagai ilmu terapan (*applied science*). Tujuan akhir dari riset dalam bidang ini bukanlah semata-mata untuk mempublikasikan temuan di jurnal ilmiah, melainkan untuk menghasilkan "nasihat ilmiah" (*scientific advice*) yang dapat ditindaklanjuti. Nasihat ini menjadi masukan kritis bagi para pengambil keputusan—baik itu pemerintah, organisasi perikanan regional, maupun komunitas lokal—dalam merumuskan kebijakan pengelolaan perikanan. Produk akhir dari seorang ahli biologi perikanan sering kali bukan berupa teori baru, melainkan sebuah laporan penilaian stok (*stock assessment report*) yang merekomendasikan tingkat penangkapan yang diizinkan (*Total Allowable Catch/TAC*), batasan ukuran

minimum ikan yang boleh ditangkap, atau penutupan sementara suatu daerah penangkapan untuk melindungi area pemijahan (Sparre & Venema, 1998).

Perbedaan antara ilmu murni dan ilmu terapan dapat diilustrasikan dengan jelas di sini. Seorang ahli ekologi murni mungkin mempelajari hubungan predator-mangsa antara dua spesies ikan di laboratorium untuk memahami mekanisme evolusi bersama. Sebaliknya, seorang ahli biologi perikanan akan mempelajari hubungan yang sama di alam liar untuk mengkuantifikasi seberapa besar mortalitas alami yang disebabkan oleh predasi tersebut, dan kemudian memasukkan nilai tersebut ke dalam model populasi untuk memperkirakan berapa banyak ikan yang “tersisa” untuk ditangkap oleh manusia. Keduanya valid dan penting, namun memiliki tujuan akhir yang berbeda.

Orientasi terapan ini menuntun para praktisi biologi perikanan untuk mampu berkomunikasi secara efektif dengan berbagai pemangku kepentingan (*stakeholders*). Mereka harus dapat menerjemahkan hasil analisis statistik yang rumit dan ketidakpastian ilmiah ke dalam bahasa yang dapat dipahami oleh manajer perikanan, politisi, nelayan, dan masyarakat umum. Mereka juga harus memahami bahwa keputusan pengelolaan akhir jarang sekali didasarkan pada pertimbangan biologis semata. Faktor ekonomi, sosial, dan politik sering kali memainkan peran yang sama besar, atau bahkan lebih besar. Oleh karena itu, seorang ahli biologi perikanan yang efektif adalah seorang ilmuwan yang tidak hanya kompeten secara teknis, tetapi juga sadar akan konteks sosial-ekonomi di mana ilmunya diterapkan. Kegagalan dalam menjembatani sains dan kebijakan adalah salah satu penyebab utama dari banyaknya kasus kegagalan pengelolaan perikanan di seluruh dunia (Beddington, Agnew, & Clark, 2007).

2. Hubungan dan Perbedaan Konseptual: Biologi Perikanan, Iktiologi, Limnologi, dan Oseanografi Perikanan

Untuk memahami secara utuh posisi biologi perikanan dalam konstelasi ilmu-ilmu keairan, penting untuk menarik garis batas yang jelas, meskipun terkadang tumpang tindih, antara biologi perikanan dengan disiplin-disiplin terkait lainnya, terutama iktiologi, limnologi, dan oseanografi.

Kesalahpahaman mengenai ruang lingkup masing-masing ilmu ini dapat menyebabkan kebingungan konseptual dan aplikasi yang kurang tepat.

Biologi Perikanan Versus Iktiologi

Seperti yang telah disinggung sebelumnya, hubungan antara biologi perikanan dan iktiologi adalah hubungan antara ilmu terapan dan salah satu ilmu dasar yang menyokongnya. Iktiologi adalah cabang zoologi yang secara eksklusif mempelajari ikan. Fokusnya adalah pada ikan sebagai organisme individual atau sebagai kelompok taksonomi. Seorang iktiolog mungkin akan menghabiskan karirnya untuk merevisi taksonomi suatu famili ikan, mendeskripsikan spesies baru, mempelajari anatomi komparatif dari sistem pernapasan berbagai jenis ikan, atau meneliti endokrinologi yang mengontrol proses reproduksi ikan di tingkat seluler dan organ (Helfman, Collette, Facey, & Bowen, 2009). Hasil penelitian iktiologi bersifat fundamental dan memperkaya khazanah pengetahuan kita tentang dunia ikan.

Biologi Perikanan, di sisi lain, mengambil pengetahuan dasar dari iktiologi dan menerapkannya pada skala populasi dengan tujuan pengelolaan. Seorang ahli biologi perikanan tidak hanya tertarik pada bagaimana ikan bereproduksi, tetapi juga kapan dan di mana mereka bereproduksi secara massal (musim dan lokasi pemijahan), berapa banyak telur yang dihasilkan (fekunditas), dan pada ukuran berapa mereka pertama kali matang gonad. Informasi ini tidak hanya memperkaya pengetahuan, tetapi secara langsung digunakan untuk menetapkan regulasi seperti penutupan musim pemijahan atau ukuran minimum ikan yang boleh ditangkap.

Dengan kata lain, unit analisis fundamental bagi iktiologi adalah individu atau spesies, sedangkan bagi biologi perikanan adalah populasi atau stok. Iktiologi bertanya, "Apa itu ikan ini dan bagaimana cara kerjanya?". Biologi perikanan bertanya, "Berapa banyak jumlah ikan ini, bagaimana dinamikanya dari waktu ke waktu, dan bagaimana kita bisa memanfaatkannya secara lestari?". Keduanya saling membutuhkan: biologi perikanan tidak dapat berfungsi tanpa fondasi taksonomi dan biologi dasar

dari iktiologi, dan iktiologi mendapatkan relevansi praktis yang lebih luas melalui aplikasi dalam biologi perikanan.

Biologi Perikanan versus Limnologi dan Oseanografi Perikanan

Perbedaan serupa juga berlaku ketika membandingkan biologi perikanan dengan limnologi dan oseanografi. Limnologi adalah ilmu yang mempelajari ekosistem perairan darat (danau, waduk, sungai), sementara oseanografi adalah ilmu yang mempelajari ekosistem lautan. Keduanya mencakup studi aspek fisika (suhu, arus, gelombang), kimia (salinitas, nutrisi, oksigen terlarut), dan biologi (plankton, bentos) dari lingkungan akuatik tersebut (Wetzel, 2001; Garrison & Ellis, 2022). Fokus utama mereka adalah pada sistem ekosistem itu sendiri.

Ketika disiplin-disiplin ini mulai memfokuskan kajiannya pada bagaimana kondisi lingkungan mempengaruhi produksi dan distribusi sumber daya ikan, maka lahirlah sub-disiplin khusus seperti oseanografi perikanan (*fisheries oceanography*) atau limnologi perikanan (*fisheries limnology*). Sub-disiplin ini berupaya mencari hubungan kausal antara variabel-variabel lingkungan dengan keberhasilan reproduksi, pertumbuhan, dan kelangsungan hidup ikan. Sebagai contoh, seorang ahli oseanografi perikanan mungkin akan meneliti bagaimana fenomena El Niño-Southern Oscillation (ENSO) yang menyebabkan pemanasan suhu permukaan laut di Pasifik Timur mempengaruhi kelimpahan plankton, yang pada gilirannya menyebabkan kegagalan rekrutmen pada populasi ikan teri (*anchoveta*) di lepas pantai Peru (Bakun, 1990).

Biologi Perikanan kemudian bertindak sebagai integrator utama. Ia mengambil output dari oseanografi atau limnologi perikanan—misalnya, sebuah model yang memprediksi rekrutmen ikan berdasarkan suhu laut—dan memasukkan informasi tersebut ke dalam model penilaian stok yang lebih besar. Model penilaian stok ini juga akan mencakup data lain yang merupakan domain inti biologi perikanan, seperti data pertumbuhan individu, struktur umur populasi, dan mortalitas akibat penangkapan.

Jadi, jika diibaratkan sebuah sistem, oseanografi/limnologi perikanan berfokus pada “faktor eksternal” atau “pengaruh lingkungan” yang bekerja pada populasi ikan. Sementara itu, biologi perikanan berfokus

pada “dinamika internal” populasi itu sendiri (pertumbuhan, mortalitas, reproduksi) sambil secara aktif mengintegrasikan pengaruh faktor eksternal tersebut. Gabungan dari pemahaman dinamika internal dan eksternal inilah yang memungkinkan dilakukannya penilaian stok yang komprehensif dan perumusan strategi pengelolaan yang adaptif terhadap perubahan lingkungan. Pada akhirnya, biologi perikanan berdiri di pusat, mensintesis informasi dari iktiologi, ekologi, oseanografi, dan disiplin lainnya untuk mencapai satu tujuan terpadu: pengelolaan perikanan yang berkelanjutan.

B. Sejarah dan Evolusi Paradigma dalam Biologi Perikanan

Pemahaman terhadap kondisi biologi perikanan saat ini tidak akan lengkap tanpa menengok kembali sejarah perkembangannya. Seperti disiplin ilmu lainnya, biologi perikanan telah melalui serangkaian evolusi pemikiran dan pergeseran paradigma. Perjalanan ini merefleksikan kemajuan teknologi, perkembangan teori ekologi, dan yang tidak kalah penting, respons terhadap krisis-krisis yang terjadi dalam dunia perikanan global. Sejarah ini dapat secara garis besar dibagi menjadi dua era utama: era deskriptif kualitatif yang didominasi oleh pendekatan sejarah alam, dan era kuantitatif yang melahirkan ilmu dinamika populasi ikan modern.

1. Era Awal: Dari Sejarah Alam ke Deskripsi Kualitatif

Akar dari studi tentang ikan dapat ditelusuri kembali hingga zaman Aristoteles, yang membuat observasi mendetail tentang biologi dan perilaku lebih dari seratus spesies ikan di Laut Aegea. Namun, biologi perikanan sebagai sebuah disiplin ilmu yang terorganisir baru benar-benar mulai terbentuk pada akhir abad ke-19. Periode ini didorong oleh kekhawatiran yang semakin meningkat di Eropa mengenai dampak dari metode penangkapan ikan yang baru dan lebih efisien, seperti kapal pukat uap (*steam trawler*), terhadap stok ikan komersial di Laut Utara (Smith, 1994).

Para ilmuwan perikanan perintis pada era ini adalah para naturalis yang menerapkan metode observasi dan deskripsi yang cermat. Fokus utama mereka adalah untuk membangun pemahaman dasar mengenai siklus hidup spesies-spesies target. Pertanyaan yang ingin mereka jawab

bersifat fundamental dan kualitatif: Di mana ikan ini ditemukan? Apa saja yang dimaknanya? Kapan musim pemijahannya? Bagaimana membedakan ikan muda dari ikan dewasa?

Salah satu tokoh sentral dari periode ini adalah Carl Georg Johannes Petersen dari Denmark. Pada dekade 1890-an, ia mengembangkan dua teknik yang menjadi pilar biologi perikanan hingga hari ini. Pertama, ia adalah pionir dalam penggunaan metode penandaan (*tagging*) untuk mempelajari migrasi dan pertumbuhan ikan. Dengan memasang label pada ikan *plaice* (sejenis ikan pipih) dan melepaskannya kembali ke laut, ia dapat melacak pergerakan mereka dan menghitung laju pertumbuhan saat ikan tersebut tertangkap kembali. Kedua, ia mengembangkan "Metode Petersen", yaitu analisis distribusi frekuensi panjang, sebagai cara untuk memisahkan kelompok-kelompok umur yang berbeda dalam suatu populasi dan memperkirakan pertumbuhan (Cushing, 1988). Metode ini, meskipun sederhana, merupakan langkah awal yang krusial menuju analisis populasi yang lebih kuantitatif.

Kontribusi penting lainnya datang dari Friedrich Heincke di Jerman, yang pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20 melakukan studi ekstensif terhadap ikan *herring*. Ia adalah orang pertama yang secara sistematis menggunakan karakter meristik (hitungan bagian tubuh seperti jumlah ruas tulang belakang atau sirip) untuk membedakan antar populasi atau "ras" ikan *herring* yang berbeda. Karyanya meletakkan dasar bagi konsep "unit stok", yaitu gagasan bahwa suatu spesies ikan mungkin tidak terdiri dari satu populasi tunggal yang homogen, melainkan dari beberapa sub-populasi yang relatif terisolasi dan harus dikelola secara terpisah. Konsep ini tetap menjadi landasan fundamental dalam pengelolaan perikanan modern (Sinclair, 1988).

Puncak dari era awal ini ditandai oleh pembentukan sebuah lembaga yang sangat berpengaruh, yaitu *International Council for the Exploration of the Sea* (ICES), pada tahun 1902 di Kopenhagen. Pendirian ICES merupakan pengakuan formal dari negara-negara di sekitar Laut Utara bahwa masalah perikanan bersifat lintas batas dan membutuhkan kerja sama riset internasional. ICES menjadi forum bagi para ilmuwan untuk berkolaborasi, menstandarisasi metode pengumpulan data (seperti statistik

pendaratan ikan dan data upaya penangkapan), dan mengkoordinasikan survei-survei sumber daya ikan di laut (Rozwadowski, 2002).

Meskipun pada periode ini model matematika yang kompleks belum mendominasi, fondasi empiris yang diletakkan oleh para ilmuwan seperti Petersen, Heincke, dan kolega mereka di ICES sangatlah vital. Mereka berhasil mengidentifikasi parameter-parameter kunci yang perlu diukur—yaitu umur, pertumbuhan, dan reproduksi—dan mengembangkan metode-metode praktis untuk mengukurnya di lapangan. Tanpa kerja keras pengumpulan data deskriptif dan pengembangan metode dasar ini, revolusi kuantitatif yang akan terjadi pada pertengahan abad ke-20 tidak akan pernah mungkin terjadi. Era ini adalah tentang belajar “alfabet” dari biologi ikan sebelum mencoba untuk “menulis novel” tentang dinamika populasinya. Era ini juga menunjukkan bahwa sejak awal, biologi perikanan lahir dari sebuah kebutuhan praktis untuk mengelola dampak aktivitas manusia terhadap sumber daya alam.

2. Perkembangan Pendekatan Kuantitatif: Lahirnya Dinamika Populasi Ikan

Jika era awal biologi perikanan diibaratkan sebagai fase pengumpulan fakta, maka periode yang dimulai sekitar tahun 1930-an dan mencapai puncaknya setelah Perang Dunia II adalah fase sintesis dan pengembangan teori. Ini adalah era di mana biologi perikanan bertransformasi dari ilmu yang sebagian besar bersifat deskriptif menjadi disiplin yang sangat kuantitatif, yang kemudian dikenal sebagai dinamika populasi ikan. Pergeseran paradigma ini dipicu oleh kesadaran bahwa deskripsi saja tidak cukup untuk memberikan nasihat pengelolaan yang solid. Para manajer tidak hanya perlu tahu bagaimana ikan tumbuh, tetapi juga seberapa besar dampak penangkapan terhadap kelimpahan populasi secara keseluruhan.

Langkah konseptual pertama yang paling penting diambil oleh E.S. Russell dari Inggris pada tahun 1931. Ia merumuskan sebuah persamaan yang tampaknya sederhana namun memiliki dampak luar biasa dalam membongkai cara berpikir para ilmuwan perikanan. Persamaan Russell menyatakan:

$$S_2 = S_1 + (A + G) - (C + M)$$

dimana:

- a. S_2 adalah biomassa stok pada akhir suatu periode waktu.
- b. S_1 adalah biomassa stok pada awal periode waktu.
- c. A adalah penambahan biomassa dari rekrutmen (ikan-ikan baru yang masuk ke dalam populasi).
- d. G adalah penambahan biomassa dari pertumbuhan individu ikan yang sudah ada.
- e. C adalah pengurangan biomassa akibat penangkapan oleh manusia (*catch*).
- f. M adalah pengurangan biomassa akibat mortalitas alami (predasi, penyakit, usia tua).

Persamaan ini secara elegan merangkum semua proses kunci yang mengatur dinamika sebuah populasi yang dieksploitasi. Ia memperjelas bahwa kondisi sebuah stok ikan adalah hasil dari keseimbangan antara proses penambahan (rekrutmen dan pertumbuhan) dan proses pengurangan (penangkapan dan mortalitas alami). Yang terpenting, persamaan ini secara eksplisit menempatkan "Penangkapan" (C) sebagai salah satu faktor utama yang dapat dikontrol oleh manusia, sehingga membuka jalan bagi pengelolaan yang berbasis pada pengendalian laju penangkapan (Russell, 1931). Persamaan ini menjadi kerangka kerja konseptual yang mendasari hampir semua model dinamika populasi yang dikembangkan sesudahnya.

Revolusi kuantitatif mencapai puncaknya pada dekade 1950-an dengan munculnya dua kerangka pemodelan utama yang hingga kini menjadi pilar ilmu perikanan. Kedua pendekatan ini, meskipun berbeda secara filosofis dan matematis, sama-sama bertujuan untuk memprediksi hasil tangkapan yang dapat diperoleh dari suatu stok ikan berdasarkan tingkat upaya penangkapan yang berbeda.

Pendekatan pertama adalah model analitik atau model berstruktur umur, yang karya puncaknya adalah monograf "On the Dynamics of Exploited Fish Populations" oleh Ray Beverton dan Sidney Holt pada tahun 1957. Model Beverton-Holt adalah model yang sangat mekanistik. Ia mengikuti sebuah kohort (kelompok ikan yang lahir pada waktu yang sama)

sepanjang siklus hidupnya. Model ini secara matematis mengintegrasikan informasi detail mengenai laju pertumbuhan individu (menggunakan model von Bertalanffy), laju mortalitas alami, dan laju mortalitas penangkapan (yang bervariasi tergantung pada ukuran ikan dan alat tangkap). Dengan mensimulasikan keseimbangan antara penambahan berat tubuh melalui pertumbuhan dan kehilangan jumlah individu melalui mortalitas, model ini dapat menghitung "hasil per rekrut" (*yield-per-recruit*). Artinya, untuk setiap ikan yang berhasil masuk ke area penangkapan, model ini bisa memprediksi berapa total bobot hasil tangkapan yang bisa didapat dari kohort tersebut di bawah skenario pengelolaan yang berbeda (misalnya, mengubah intensitas penangkapan atau ukuran minimum ikan yang boleh ditangkap) (Beverton & Holt, 1957).

Pendekatan kedua adalah model produksi surplus atau model holistik, yang dipelopori oleh Milner B. Schaefer pada tahun 1954. Berbeda dengan Beverton dan Holt yang memodelkan nasib setiap kohort secara detail, Schaefer mengambil pendekatan yang lebih sederhana dan agregat. Ia memperlakukan seluruh biomassa stok ikan sebagai satu unit tunggal dan mengasumsikan bahwa laju pertumbuhan bersih dari biomassa tersebut adalah fungsi dari ukurannya, mengikuti kurva logistik (berbentuk parabola). Pada tingkat biomassa yang sangat rendah, laju pertumbuhan populasi juga rendah karena hanya ada sedikit individu untuk bereproduksi. Pada tingkat biomassa yang sangat tinggi (mendekati daya dukung lingkungan, K), laju pertumbuhan juga melambat karena adanya kompetisi internal untuk makanan dan ruang. Laju pertumbuhan maksimum terjadi pada tingkat biomassa menengah. Model ini menyiratkan bahwa ada tingkat penangkapan tertentu yang setara dengan laju pertumbuhan maksimum ini, yang kemudian dikenal sebagai Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari atau *Maximum Sustainable Yield* (MSY) (Schaefer, 1954).

Kemunculan model-model kuantitatif ini, khususnya konsep MSY dari model Schaefer, memiliki dampak yang sangat besar dan mendalam terhadap praktik pengelolaan perikanan di seluruh dunia selama beberapa dekade. Konsep MSY sangat menarik bagi para manajer dan pembuat kebijakan karena ia menawarkan sebuah target yang tampaknya sederhana, jelas, dan optimal secara ilmiah: tangkaplah ikan pada tingkat MSY, maka

kita akan mendapatkan hasil tangkapan terbesar yang mungkin tanpa menghabiskan sumber daya. Banyak undang-undang dan perjanjian perikanan internasional, termasuk Konvensi PBB tentang Hukum Laut (UNCLOS), secara eksplisit mengadopsi MSY sebagai tujuan utama pengelolaan (Quinn II & Deriso, 1999).

Periode ini mengukuhkan status biologi perikanan sebagai ilmu kuantitatif yang canggih. Laboratorium-laboratorium perikanan di seluruh dunia mulai dipenuhi oleh para ahli biologi yang juga mahir dalam matematika dan statistika. Fokus riset bergeser dari sekadar mendeskripsikan siklus hidup menjadi mengestimasi parameter-parameter kunci yang dibutuhkan oleh model-model ini: laju pertumbuhan (K, L_{∞}), laju mortalitas alami (M), laju mortalitas penangkapan (F), dan hubungan antara stok dan rekrutmen.

Namun, seiring berjalannya waktu, ketergantungan yang berlebihan pada paradigma MSY mulai menunjukkan kelemahannya. Para ilmuwan menyadari bahwa model-model awal ini sering kali terlalu menyederhanakan realitas. Mereka cenderung mengabaikan variabilitas lingkungan yang sangat mempengaruhi rekrutmen, mengabaikan interaksi antar spesies dalam ekosistem (misalnya, hubungan predator-mangsa), dan sering kali didasarkan pada data perikanan yang tidak pasti dan tidak lengkap. Kegagalan pengelolaan pada banyak stok ikan penting di dunia pada akhir abad ke-20, meskipun telah dikelola dengan target MSY, memicu pergeseran paradigma selanjutnya menuju pendekatan yang lebih hati-hati (*precautionary approach*) dan berbasis ekosistem (*ecosystem-based approach*). Evolusi ini menunjukkan bahwa biologi perikanan adalah ilmu yang terus belajar dan beradaptasi, didorong oleh keberhasilan maupun kegagalan dalam upaya mencapai tujuan utamanya: perikanan yang berkelanjutan. Topik-topik inilah yang akan menjadi pembahasan mendalam pada bab-bab selanjutnya dari buku ini.

C. Peran Vital Biologi Perikanan dalam Pengelolaan Sumber Daya Ikan Berkelanjutan

Tujuan akhir dari seluruh upaya ilmiah dalam biologi perikanan adalah untuk berkontribusi pada satu cita-cita besar: terwujudnya pengelolaan

sumber daya ikan yang berkelanjutan (*sustainable fisheries management*). Konsep keberlanjutan, yang secara luas didefinisikan oleh Komisi Brundtland sebagai “pembangunan yang memenuhi kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri”, memiliki makna yang sangat spesifik dalam konteks perikanan. Keberlanjutan perikanan adalah sebuah paradigma pengelolaan yang berupaya menyeimbangkan tiga pilar utama: integritas ekologis, kelayakan ekonomi, dan keadilan sosial (FAO, 1995).

Secara ekologis, perikanan berkelanjutan berarti aktivitas penangkapan tidak boleh menyebabkan populasi target jatuh di bawah tingkat yang dapat memastikan pemulihannya. Lebih jauh lagi, aktivitas tersebut tidak boleh secara signifikan merusak struktur, fungsi, dan keanekaragaman hayati dari ekosistem perairan tempat perikanan itu beroperasi. Secara ekonomi, perikanan harus dapat memberikan keuntungan yang wajar bagi para pelakunya, mulai dari nelayan hingga industri pengolahan. Secara sosial, pengelolaan harus adil, merata, dan memastikan bahwa manfaat dari sumber daya perikanan dapat dirasakan oleh masyarakat, khususnya komunitas pesisir yang kehidupannya sangat bergantung pada laut.

Dalam kerangka tiga pilar ini, biologi perikanan memegang peranan sebagai fondasi ilmiah, khususnya untuk pilar ekologis. Tanpa masukan data dan analisis yang valid dari para ahli biologi perikanan, keputusan pengelolaan akan menjadi buta. Keputusan yang diambil hanya berdasarkan pertimbangan ekonomi jangka pendek atau tekanan politik sesaat hampir selalu berujung pada eksploitasi berlebih (*overexploitation*) dan kolapsnya stok ikan, sebuah tragedi ekologis dan ekonomi yang telah berulang kali terjadi di berbagai belahan dunia (Pauly et al., 2002). Oleh karena itu, biologi perikanan bukan sekadar disiplin akademis; ia adalah komponen yang mutlak diperlukan (*indispensable*) dalam mesin pengelolaan perikanan modern. Perannya adalah menyediakan “peta dan kompas” ilmiah yang memandu para manajer untuk menavigasi kompleksitas lautan dan populasinya, menghindari “badai” kolapsnya stok, dan menuju “pelabuhan” keberlanjutan.

1. Penyediaan Fondasi Ilmiah untuk Kebijakan dan Regulasi Perikanan

Peran paling konkret dan fundamental dari biologi perikanan adalah menyediakan landasan bukti ilmiah (*evidence-based foundation*) untuk pembuatan kebijakan dan peraturan. Fungsi ini diwujudkan melalui serangkaian kegiatan analitis yang outputnya secara langsung digunakan oleh para pengambil keputusan. Aktivitas sentral dalam proses ini adalah penilaian stok (*stock assessment*).

Penilaian stok adalah proses terstruktur untuk mengumpulkan, menganalisis, dan melaporkan informasi mengenai kondisi, kesehatan, dan status eksploitasi suatu populasi ikan. Ini adalah "pemeriksaan kesehatan" komprehensif untuk populasi ikan. Melalui penerapan model-model matematis yang telah dibahas sebelumnya (seperti model produksi surplus atau model berstruktur umur), seorang ahli biologi perikanan dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan kritis: Seberapa besar biomassa stok saat ini? Apakah laju penangkapan saat ini berada di atas atau di bawah tingkat yang lestari? Apakah biomassa stok berada di atas atau di bawah ambang batas biologis yang aman? (Hilborn & Walters, 1992).

Hasil dari penilaian stok ini biasanya dirangkum dalam bentuk perbandingan antara kondisi populasi saat ini dengan serangkaian titik referensi (*reference points*) biologis. Titik referensi ini berfungsi sebagai tolok ukur atau rambu-rambu dalam pengelolaan. Secara umum, mereka terbagi menjadi dua kategori:

- a. Titik Referensi Target (*Target Reference Points* - TRP): Ini adalah kondisi stok yang diinginkan atau menjadi tujuan pengelolaan. Contoh paling klasik adalah MSY (*Maximum Sustainable Yield*) beserta parameter turunannya seperti B_{MSY} (biomassa yang menghasilkan MSY) dan F_{MSY} (laju mortalitas penangkapan yang menghasilkan MSY). Manajer akan berusaha mengarahkan perikanan agar beroperasi di sekitar titik referensi target ini.
- b. Titik Referensi Batas (*Limit Reference Points* - LRP): Ini adalah kondisi stok yang harus dihindari. LRP merepresentasikan ambang batas di mana risiko kerusakan serius pada stok (misalnya, kegagalan rekrutmen atau pemulihan yang sangat lambat) menjadi sangat tinggi. Jika status stok mendekati atau melewati LRP, tindakan pengelolaan yang tegas

dan sering kali drastis (seperti moratorium penangkapan) harus segera diambil untuk memulihkan stok. Contoh LRP adalah tingkat biomassa minimum di mana rekrutmen terbukti mulai terganggu (B_{lim}) (Caddy & Mahon, 1995).

Dengan menyediakan analisis status stok relatif terhadap TRP dan LRP, biologi perikanan memberikan informasi objektif kepada manajer tentang “lampu lalu lintas” perikanan: hijau (aman), kuning (perlu hati-hati), atau merah (berbahaya).

Berdasarkan hasil penilaian stok dan perbandingannya dengan titik referensi biologis, biologi perikanan memberikan rekomendasi untuk penerapan berbagai instrumen regulasi. Instrumen-instrumen ini dirancang untuk mengontrol tingkat eksploitasi agar tetap berada dalam batas-batas yang berkelanjutan. Beberapa contoh regulasi yang secara langsung diturunkan dari data biologi perikanan meliputi:

- a. Kuota Hasil Tangkapan (*Total Allowable Catch* - TAC): Ini adalah salah satu bentuk regulasi output yang paling umum. TAC menetapkan jumlah total ikan (dalam tonase) dari stok tertentu yang boleh ditangkap dalam satu periode waktu (biasanya satu tahun). Nilai TAC ini bukanlah angka yang muncul secara acak; ia adalah hasil perhitungan langsung dari model penilaian stok. Model tersebut memproyeksikan berapa banyak ikan yang dapat diambil agar biomassa stok tetap berada di sekitar target (B_{MSY}) atau pulih menuju target tersebut.
- b. Pengaturan Ukuran Ikan Minimum (*Minimum Size Limits*): Regulasi ini melarang penangkapan dan pendaratan ikan yang lebih kecil dari ukuran tertentu. Dasar ilmiah untuk kebijakan ini berasal dari studi biologi reproduksi. Dengan mengetahui ukuran rata-rata saat ikan pertama kali matang gonad (L_m), manajer dapat menetapkan ukuran minimum legal sedikit di atas L_m . Tujuannya adalah untuk memberikan kesempatan bagi setiap individu ikan untuk bereproduksi setidaknya satu kali sebelum ia rentan untuk ditangkap. Strategi ini dikenal sebagai “biarkan mereka memijah sekali” (*let them spawn once*) dan sangat krusial untuk menjaga potensi regenerasi populasi di masa depan (Vasilakopoulos, O’Neill, & Marshall, 2016).

- c. Penutupan Musim dan/atau Daerah Penangkapan (*Closed Seasons and/or Areas*): Kebijakan ini melarang aktivitas penangkapan pada waktu atau lokasi tertentu. Dasarnya adalah data biologi mengenai pemijahan dan siklus hidup. Studi tentang tingkat kematangan gonad (TKG) dan indeks kematangan gonad (IKG) dapat mengidentifikasi puncak musim pemijahan. Sementara itu, survei telur dan larva dapat memetakan lokasi-lokasi yang menjadi daerah pemijahan (*spawning ground*) atau daerah asuhan (*nursery ground*) utama. Dengan menutup area dan waktu ini dari aktivitas penangkapan, regulasi ini memberikan perlindungan krusial bagi ikan dewasa yang sedang berkumpul untuk memijah dan bagi larva serta yuwana yang sangat rentan.

Singkatnya, dari analisis populasi yang kompleks hingga rekomendasi kebijakan yang praktis, biologi perikanan menyediakan rantai logika ilmiah yang sangat diperlukan untuk pengelolaan perikanan yang rasional.

2. Kontribusi dalam Konservasi Biodiversitas Perairan dan Ekosistem

Peran biologi perikanan tidak berhenti pada pengelolaan spesies target tunggal. Dalam beberapa dekade terakhir, telah terjadi pergeseran paradigma fundamental dalam ilmu perikanan, dari pendekatan spesies tunggal (*single-species approach*) menuju Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (*Ecosystem Approach to Fisheries Management - EAFM*). Paradigma baru ini mengakui bahwa perikanan tidak beroperasi dalam ruang hampa; ia adalah bagian dari ekosistem yang kompleks dan aktivitasnya dapat menimbulkan dampak yang luas melampaui populasi target (Pikitch et al., 2004).

Biologi perikanan modern memainkan peran sentral dalam mendukung implementasi EAFM. Kontribusinya meluas ke pemahaman dan mitigasi tiga jenis dampak utama perikanan terhadap ekosistem:

- a. Dampak pada Spesies Non-Target (*Bycatch*): Alat tangkap, terutama yang tidak selektif seperti pukat harimau (*trawl*), sering kali menangkap berbagai spesies yang tidak diinginkan atau tidak memiliki nilai ekonomis, yang dikenal sebagai hasil tangkapan sampingan (*bycatch*). *Bycatch* ini dapat mencakup ikan non-target, penyu, mamalia laut, dan burung laut, banyak di antaranya merupakan spesies yang

dilindungi atau terancam punah. Ahli biologi perikanan bertugas untuk mengkuantifikasi jumlah dan komposisi bycatch melalui program pemantauan di atas kapal (*onboard observer programs*). Informasi ini digunakan untuk merancang modifikasi alat tangkap agar lebih selektif (misalnya, penggunaan *Turtle Excluder Device* pada pukat udang) atau untuk menetapkan batasan bycatch yang diizinkan (Garcia et al., 2003).

- b. Dampak pada Jaring-jaring Makanan (*Trophic Interactions*): Penangkapan ikan secara besar-besaran dapat mengubah struktur jaring-jaring makanan di laut. Menghilangkan sejumlah besar ikan predator puncak (seperti tuna atau hiu) dapat menyebabkan ledakan populasi mangsanya (efek *top-down control*). Sebaliknya, penangkapan masif terhadap ikan-ikan kecil di tingkat trofik rendah (seperti sarden atau teri), yang merupakan makanan utama bagi banyak predator, dapat menyebabkan kelaparan pada populasi predator di atasnya (efek *bottom-up control*). Biologi perikanan, khususnya melalui studi kebiasaan makanan (*food habits*) dan pemodelan ekosistem (misalnya, dengan perangkat lunak Ecopath with Ecosim), membantu memetakan hubungan trofik ini dan memprediksi konsekuensi dari berbagai skenario penangkapan terhadap seluruh ekosistem.
- c. Dampak pada Habitat: Beberapa jenis alat tangkap, terutama yang bersentuhan dengan dasar laut seperti pukat dasar (*bottom trawl*) atau *dredge*, dapat menyebabkan kerusakan fisik yang signifikan pada habitat bentik. Mereka dapat meratakan struktur kompleks seperti terumbu karang, taman spons, atau padang lamun, yang berfungsi sebagai habitat vital bagi banyak spesies. Ahli biologi perikanan bekerja sama dengan ahli geologi kelautan dan ekologi bentik untuk memetakan habitat-habitat sensitif ini dan menilai tingkat kerusakan akibat aktivitas perikanan, yang kemudian dapat digunakan sebagai dasar untuk penetapan Kawasan Konservasi Perairan (KKP) atau penutupan area bagi alat tangkap yang merusak.

Dengan demikian, peran biologi perikanan telah berevolusi secara signifikan. Ia tidak lagi hanya menjadi "akuntan" bagi stok ikan komersial, tetapi telah menjadi "dokter ekosistem" yang mendiagnosis kesehatan sistem perairan secara keseluruhan. Kontribusi dalam EAFM ini memastikan

bahwa tujuan keberlanjutan tidak hanya dilihat dari perspektif populasi target, tetapi juga dari kelestarian keanekaragaman hayati dan integritas fungsional ekosistem yang menopangnya.

Sebagai kesimpulan dari bab pengantar ini, jelaslah bahwa biologi perikanan adalah disiplin ilmu yang dinamis, relevan, dan sangat diperlukan. Ia telah berkembang dari seni deskripsi sejarah alam menjadi ilmu kuantitatif prediktif yang menjadi tulang punggung pengelolaan perikanan modern. Dengan menyediakan dasar ilmiah untuk kebijakan, mulai dari penetapan kuota tangkap untuk satu spesies hingga perlindungan habitat untuk seluruh komunitas, biologi perikanan berada di garis depan dalam upaya global untuk menyeimbangkan kebutuhan manusia akan protein dan mata pencaharian dengan imperatif untuk melestarikan kekayaan hayati lautan bagi generasi mendatang.

Tantangan di masa depan semakin besar. Perubahan iklim global mengubah suhu dan kimia lautan, yang berdampak pada distribusi, pertumbuhan, dan reproduksi ikan dengan cara yang belum pernah terjadi sebelumnya. Tekanan dari polusi, perusakan habitat pesisir, dan permintaan pasar yang terus meningkat menambah kompleksitas masalah. Dalam menghadapi tantangan-tantangan ini, peran biologi perikanan yang adaptif, terintegrasi, dan berprinsip kehati-hatian akan menjadi lebih vital daripada sebelumnya.

Untuk dapat memahami dan mengatasi dinamika populasi yang kompleks tersebut, kita harus terlebih dahulu membangun fondasi yang kokoh pada skala yang lebih fundamental: yaitu biologi individu ikan itu sendiri. Oleh karena itu, bab selanjutnya akan membawa kita kembali ke dasar, menjelajahi dunia iktiologi terapan, dimulai dengan bagaimana bentuk dan struktur tubuh seekor ikan menentukan cara hidupnya dan bagaimana kita dapat mengukurnya untuk tujuan pengelolaan.

Bab sebelumnya telah memaparkan biologi perikanan sebagai ilmu terapan yang bertujuan mengelola populasi ikan secara berkelanjutan. Namun, untuk dapat menganalisis dan memodelkan dinamika sebuah populasi secara akurat, pemahaman yang mendalam mengenai unit dasar dari populasi tersebut—yaitu individu ikan—adalah sebuah keniscayaan. Bab ini akan menyajikan fondasi ikhtiologi yang paling relevan dan esensial bagi seorang ahli biologi perikanan. Ikhtiologi, sebagai ilmu yang mempelajari ikan, menyediakan perangkat konseptual dan metodologis untuk memahami bagaimana ikan beradaptasi dengan lingkungannya, bagaimana fungsi tubuhnya bekerja, dan bagaimana kita dapat mengidentifikasinya dengan benar. Pengetahuan ini bukan hanya bersifat akademis, tetapi memiliki implikasi praktis yang langsung dalam setiap tahapan analisis biologi perikanan, mulai dari pengambilan sampel di lapangan hingga interpretasi hasil pemodelan yang kompleks. Kita akan memulai penjelajahan ini dari aspek yang paling fundamental dan kasat mata: bentuk dan ukuran tubuh ikan.

A. Morfologi dan Morfometrik Ikan

Morfologi adalah cabang biologi yang mempelajari bentuk dan struktur eksternal suatu organisme. Dalam konteks ikan, morfologi membahas segala sesuatu mulai dari bentuk umum tubuh, tipe mulut, bentuk dan posisi sirip, hingga struktur sisik dan kulit. Setiap fitur morfologis ini bukanlah hasil dari kebetulan, melainkan produk dari proses evolusi selama jutaan tahun yang telah membentuk ikan agar sesuai dengan cara hidup dan lingkungan spesifiknya, sebuah konsep yang dikenal sebagai ekomorfologi (Norton, Luczkovich, & Motta, 1995).

Sementara itu, morfometrik adalah pendekatan kuantitatif terhadap morfologi. Ia melibatkan pengukuran sistematis dari berbagai dimensi

tubuh (misalnya, panjang, tinggi, lebar) untuk menangkap karakteristik bentuk secara numerik. Di samping morfometrik, terdapat pula meristik, yaitu penghitungan bagian-bagian tubuh yang berseri, seperti jumlah jari-jari sirip atau jumlah sisik. Bagi seorang ahli biologi perikanan, studi morfologi, morfometrik, dan meristik memiliki dua tujuan utama. Pertama, untuk memahami bagaimana adaptasi bentuk tubuh memengaruhi ekologi ikan, yang pada gilirannya menentukan bagaimana ikan tersebut berinteraksi dengan lingkungannya dan dengan alat tangkap. Kedua, untuk menggunakan variasi morfometrik dan meristik sebagai alat untuk membedakan antar populasi atau stok yang berbeda.

1. Adaptasi Bentuk Tubuh Ikan dan Korelasinya dengan Habitat serta Tingkah Laku

Bentuk tubuh ikan adalah salah satu petunjuk paling jelas mengenai gaya hidupnya. Variasi bentuk tubuh yang luar biasa di antara spesies ikan merefleksikan spesialisasi mereka untuk berenang, mencari makan, dan menghindari predator di habitat yang berbeda. Secara umum, bentuk tubuh ikan dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa tipe utama, yang masing-masing memiliki konsekuensi hidrodinamik dan ekologis yang berbeda (Webb, 1984).

- a. Fusiform (Bentuk Torpedo): Bentuk ini dicirikan oleh tubuh yang ramping, silindris di bagian tengah dan meruncing di kedua ujungnya, seperti torpedo atau cerutu. Contoh klasik adalah ikan tuna, tongkol, tenggiri, dan makarel. Bentuk fusiform adalah adaptasi optimal untuk pergerakan yang cepat dan efisien dalam jangka waktu lama di perairan terbuka (habitat pelagis). Bentuk ini menghasilkan hambatan (*drag*) yang minimal saat ikan bergerak maju, memungkinkan mereka untuk menjadi perenang jelajah yang tangguh, mengejar mangsa berkecepatan tinggi, atau melakukan migrasi jarak jauh.
- b. Compressiform (Pipih Lateral): Ikan dengan bentuk ini memiliki tubuh yang sangat pipih dari sisi ke sisi (gepeng secara lateral). Contohnya termasuk ikan kuwe (*giant trevally*), bawal, baronang, dan banyak spesies ikan terumbu karang seperti *angelfish*. Bentuk tubuh ini tidak dirancang untuk kecepatan jelajah yang berkelanjutan, tetapi memberikan keuntungan luar biasa dalam hal manuverabilitas. Tubuh

yang pipih dan tinggi memungkinkan ikan untuk melakukan putaran tajam dan bergerak dengan lincah di antara struktur habitat yang kompleks seperti terumbu karang atau vegetasi akuatik. Bentuk ini juga memungkinkan mereka untuk berakselerasi dengan cepat dalam jarak pendek untuk menyergap mangsa atau melarikan diri dari predator.

- c. **Depressiform (Pipih Dorso-ventral):** Bentuk ini merupakan kebalikan dari *compressiform*, di mana tubuh ikan pipih dari atas ke bawah. Contoh paling ekstrem adalah ikan pari dan beberapa jenis hiu benthik. Bentuk tubuh ini merupakan adaptasi sempurna untuk kehidupan di dasar perairan (habitat benthik). Ikan dapat berbaring rata di atas substrat, sering kali mengubur diri di pasir atau lumpur untuk berkamuflase sambil menunggu mangsa atau bersembunyi dari predator. Ikan sebelah (*flatfishes*) juga menunjukkan bentuk depressiform, meskipun secara evolusioner mereka sebenarnya adalah ikan *compressiform* yang berbaring miring pada salah satu sisinya.
- d. **Anguilliform (Bentuk Belut):** Ikan dengan bentuk ini memiliki tubuh yang sangat panjang dan ramping, menyerupai ular atau belut. Contohnya termasuk sidat dan belut laut. Bentuk tubuh ini memungkinkan ikan untuk bergerak dengan cara meliuk-liuk (gerakan anguilliform) dan memasuki celah-celah sempit, liang, atau bebatuan yang tidak dapat diakses oleh ikan dengan bentuk tubuh lain. Ini adalah adaptasi yang efektif untuk hidup di habitat yang sangat kompleks atau di dalam substrat lunak.

Selain bentuk tubuh secara keseluruhan, fitur-fitur morfologis spesifik lainnya juga memberikan wawasan mendalam tentang ekologi seekor ikan.

Bentuk dan Posisi Mulut: Posisi mulut adalah indikator yang sangat baik dari kebiasaan makan ikan.

- a. **Superior:** Mulut menghadap ke atas, dengan rahang bawah lebih panjang dari rahang atas. Ini adalah ciri khas ikan pemakan permukaan (*surface feeder*), seperti ikan arwana atau julung-julung, yang memangsa serangga atau ikan kecil di dekat permukaan air.
- b. **Terminal:** Mulut berada di ujung moncong, dengan rahang atas dan bawah yang kurang lebih sama panjang. Ini adalah tipe mulut yang

paling umum, ditemukan pada ikan yang aktif mengejar mangsanya di kolom air, seperti ikan kembung atau tongkol.

- c. Inferior (atau Sub-terminal): Mulut berada di bagian bawah kepala. Ini adalah adaptasi untuk makan di dasar perairan (*bottom feeder*), seperti pada ikan mas atau banyak jenis ikan lele, yang mencari makan cacing atau invertebrata lain di substrat. Beberapa jenis, seperti ikan pari, memiliki mulut inferior yang sangat jelas.

Bentuk Sirip Ekor (Kaudal): Sirip ekor adalah “mesin pendorong” utama bagi sebagian besar ikan, dan bentuknya sangat berkaitan dengan gaya berenang. Kinerja sirip ekor dapat diukur dengan rasio aspek (*Aspect Ratio - AR*), yang dihitung sebagai $(\text{tinggi sirip})^2 / \text{luas permukaan sirip}$.

- a. AR Tinggi (Bentuk Sabit/Lunate atau Bercagak Dalam/Forked): Ditemukan pada ikan tuna, tenggiri, dan layaran. Bentuk ini sangat efisien untuk menghasilkan daya dorong yang kuat dan berkelanjutan dengan sedikit hambatan. Ini adalah ciri perenang pelagis yang cepat dan aktif.
- b. AR Rendah (Bentuk Membulat/Rounded atau Terpotong/Truncate): Ditemukan pada ikan kerapu, gabus, atau banyak ikan karang. Bentuk ini tidak efisien untuk berenang jarak jauh, tetapi sangat efektif untuk menghasilkan akselerasi yang cepat dan ledakan tenaga untuk menyerang mangsa atau melakukan manuver mendadak.

Pemahaman ekomorfologi ini penting bagi ahli biologi perikanan karena ia membantu menginterpretasikan data. Misalnya, jika hasil tangkapan didominasi oleh ikan berbentuk fusiform, ini mengindikasikan bahwa perikanan tersebut beroperasi di habitat pelagis. Selain itu, bentuk tubuh dan gaya berenang juga mempengaruhi kerentanan ikan terhadap jenis alat tangkap tertentu. Ikan yang lincah dan mampu bermanuver (*compressiform*) mungkin lebih mampu menghindari mulut jaring pukat dibandingkan ikan perenang lurus yang kurang lincah.

2. Aplikasi Pengukuran Morfometrik dan Meristik untuk Analisis Stok

Setelah memahami signifikansi kualitatif dari bentuk tubuh, langkah selanjutnya adalah kuantifikasi. Di sinilah morfometrik dan meristik

memainkan peran krusial, terutama dalam salah satu tugas paling fundamental dalam biologi perikanan: identifikasi stok (*stock identification*).

Definisi formal dari masing-masing pendekatan adalah sebagai berikut:

- a. Morfometrik: Pengukuran kuantitatif terhadap ciri-ciri bentuk tubuh. Karakter morfometrik merupakan variabel kontinu yang dapat diukur dengan alat seperti jangka sorong. Contohnya meliputi Panjang Total (*Total Length/TL*), Panjang Baku (*Standard Length/SL*), Panjang Cagak (*Fork Length/FL*), Tinggi Badan (*Body Depth*), Panjang Kepala (*Head Length*), dan Diameter Mata (*Eye Diameter*).
- b. Meristik: Penghitungan bagian-bagian tubuh yang dapat dihitung dan bersifat diskrit (bilangan bulat). Karakter meristik meliputi jumlah jari-jari keras dan lunak pada sirip punggung (dorsal), sirip dada (pektoral), atau sirip dubur (anal); jumlah sisik pada gurat sisi (*linea lateralis*); jumlah tapis insang (*gill rakers*); dan jumlah ruas tulang belakang (*vertebrae*).

Aplikasi utama dari data morfometrik dan meristik adalah untuk menguji hipotesis tentang struktur populasi suatu spesies ikan. Konsep dasarnya adalah bahwa suatu spesies yang tersebar di wilayah geografis yang luas mungkin tidak membentuk satu populasi tunggal yang saling kawin secara acak (*panmictic population*). Sebaliknya, mereka mungkin terfragmentasi menjadi beberapa sub-populasi atau "stok" yang relatif terisolasi satu sama lain (Cadrin, 2005).

Penyebab isolasi ini bisa bermacam-macam, seperti jarak geografis yang jauh, adanya daratan atau arus laut yang menjadi penghalang, atau perbedaan perilaku (misalnya, kecenderungan untuk kembali ke tempat kelahiran yang sama untuk memijah). Isolasi ini memiliki dua konsekuensi penting yang dapat dideteksi melalui analisis morfologi:

- a. Divergensi Genetik: Jika aliran gen antar populasi terbatas, mutasi acak dan hanyutan genetik (*genetic drift*) dapat menyebabkan frekuensi alel yang berbeda di antara populasi dari waktu ke waktu. Beberapa gen ini mungkin mengontrol ciri-ciri meristik (seperti jumlah ruas tulang belakang), yang cenderung sangat ditentukan oleh faktor genetik.

- b. *Plastisitas Fenotipik (Phenotypic Plasticity)*: Populasi yang hidup di lingkungan yang berbeda (misalnya, suhu air yang lebih dingin, ketersediaan makanan yang berbeda, atau kecepatan arus yang lebih tinggi) dapat mengembangkan bentuk tubuh yang berbeda meskipun memiliki latar belakang genetik yang sama. Misalnya, ikan yang hidup di perairan berarus deras mungkin cenderung memiliki tubuh yang lebih ramping dan hidrodinamis. Perbedaan yang diinduksi oleh lingkungan ini terutama tercermin dalam karakter morfometrik (Swain & Foote, 1999).

Dengan mengukur serangkaian karakter morfometrik dan meristik dari sampel ikan yang diambil dari lokasi-lokasi yang berbeda, seorang ahli biologi perikanan dapat menguji secara statistik apakah ada perbedaan bentuk yang signifikan di antara kelompok-kelompok tersebut.

Proses analisis untuk identifikasi stok menggunakan pendekatan morfologi biasanya mengikuti langkah-langkah sistematis. Pertama adalah pengumpulan sampel yang representatif dari semua area yang dicurigai menampung stok yang berbeda. Penting untuk memastikan ukuran sampel yang memadai dan ikan yang diukur berada dalam rentang ukuran yang serupa untuk menghindari bias akibat perubahan bentuk selama pertumbuhan (alometri).

Langkah kedua adalah pengukuran yang cermat dan terstandarisasi. Setiap individu ikan diukur untuk serangkaian karakter morfometrik dan dihitung karakter meristiknya. Konsistensi dalam teknik pengukuran sangat krusial untuk meminimalkan kesalahan pengukuran. Seringkali, untuk menghilangkan efek ukuran keseluruhan ikan (karena ikan yang lebih besar secara alami akan memiliki panjang kepala yang lebih besar), data morfometrik distandarisasi dengan mengubahnya menjadi rasio terhadap panjang baku atau panjang kepala.

Langkah ketiga adalah analisis statistik. Karena yang dianalisis adalah "bentuk" secara keseluruhan, yang merupakan kombinasi dari banyak variabel, maka teknik statistik multivariat sangat diperlukan. Analisis univariat (membandingkan rata-rata satu variabel pada satu waktu) sering

kali tidak cukup kuat untuk mendeteksi perbedaan bentuk yang halus. Beberapa teknik multivariat yang umum digunakan meliputi:

- a. Analisis Komponen Utama (*Principal Component Analysis* - PCA): Sebuah teknik eksplorasi untuk mereduksi dimensionalitas data. PCA dapat menunjukkan sumbu-sumbu variasi bentuk yang utama dalam keseluruhan sampel dan sering digunakan untuk memvisualisasikan apakah ada pengelompokan alami dari individu-individu berdasarkan lokasi pengambilan sampel mereka.
- b. Analisis Fungsi Diskriminan (*Discriminant Function Analysis* - DFA) atau Analisis Varians Multivariat (MANOVA): Ini adalah teknik statistik inferensial yang secara formal menguji apakah ada perbedaan yang signifikan secara statistik dalam bentuk rata-rata antar kelompok yang telah ditentukan sebelumnya (misalnya, lokasi A vs. lokasi B). DFA juga dapat digunakan untuk mengklasifikasikan individu yang tidak diketahui asalnya ke dalam kelompok yang paling mungkin berdasarkan morfologinya (Stransky & MacLellan, 2005).

Hasil dari analisis ini—misalnya, plot DFA yang menunjukkan bahwa kelompok ikan dari Selat Malaka terpisah dengan jelas dari kelompok ikan dari Laut Jawa—memberikan bukti kuat yang mendukung hipotesis bahwa mereka adalah dua unit stok yang berbeda. Informasi ini memiliki implikasi manajemen yang sangat besar. Jika mereka adalah stok yang terpisah, maka mereka harus dinilai (*assessed*) dan dikelola secara terpisah. Menerapkan satu kuota tangkap tunggal untuk kedua wilayah tersebut akan berisiko menyebabkan eksploitasi berlebih pada stok yang lebih kecil atau kurang produktif. Dengan demikian, morfometrik, meskipun merupakan teknik yang relatif klasik dan murah, tetap menjadi alat yang sangat berharga dan langkah awal yang penting dalam program identifikasi stok yang komprehensif.

B. Anatomi dan Fisiologi Fungsional

Setelah menjelajahi bentuk luar tubuh ikan, langkah logis berikutnya adalah “melihat ke dalam” untuk memahami bagaimana organ-organ internal bekerja dan berinteraksi. Anatomi adalah ilmu tentang struktur internal organisme, sementara fisiologi adalah ilmu tentang fungsi dari

struktur-struktur tersebut. Bagi seorang ahli biologi perikanan, pemahaman anatomi dan fisiologi fungsional bukanlah sekadar latihan akademis dalam menghafal nama-nama organ. Sebaliknya, ini adalah kunci untuk memahami bagaimana ikan merespons perubahan di lingkungannya, bagaimana mereka mengalokasikan energi untuk pertumbuhan dan reproduksi, dan bagaimana mereka berinteraksi dengan alat tangkap.

Fisiologi ikan secara fundamental menentukan batasan-batasan ekologis suatu spesies. Misalnya, toleransi suatu ikan terhadap suhu atau kadar oksigen rendah ditentukan oleh efisiensi sistem peredaran darah dan pernapasannya. Laju pertumbuhan, yang menjadi parameter sentral dalam model-model perikanan, secara langsung dikendalikan oleh efisiensi sistem pencernaannya dalam mengekstraksi energi dari makanan. Demikian pula, waktu dan keberhasilan reproduksi diatur oleh sistem endokrin (hormonal) yang kompleks.

Dalam konteks biologi perikanan terapan, pengetahuan fisiologi sangat penting untuk beberapa alasan praktis. Pertama, ia membantu menjelaskan variabilitas dalam parameter populasi. Mengapa ikan yang sama tumbuh lebih cepat di satu lokasi daripada di lokasi lain? Jawabannya sering kali terletak pada perbedaan kondisi lingkungan (misalnya, suhu) yang memengaruhi laju metabolisme dan proses fisiologis lainnya. Kedua, ia krusial dalam memahami dampak stresor, baik alami (seperti gelombang panas laut) maupun akibat manusia (seperti polusi atau stres akibat penangkapan). Stres fisiologis dapat menghambat pertumbuhan, menurunkan keberhasilan reproduksi, dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit, yang semuanya berdampak pada produktivitas stok. Ketiga, pemahaman fisiologi sensorik (penglihatan, pendengaran, penciuman) sangat relevan untuk memahami bagaimana ikan bereaksi terhadap alat tangkap, sebuah bidang studi yang dikenal sebagai tingkah laku ikan dan perikanan (*fish behaviour and fisheries*).

Bab ini akan berfokus pada tiga sistem fisiologis utama yang paling relevan bagi analisis biologi perikanan: sistem pernapasan, sistem pencernaan, dan sistem sirkulasi serta kontrol (saraf dan endokrin).

1. Sistem Pernapasan dan Adaptasinya pada Lingkungan Hipoksia

Kemampuan untuk mengekstraksi oksigen dari air adalah salah satu tantangan fisiologis paling fundamental bagi organisme akuatik. Air mengandung konsentrasi oksigen yang jauh lebih rendah dibandingkan udara—kurang dari 1% volume air dibandingkan dengan sekitar 21% volume udara. Selain itu, air jauh lebih padat dan kental daripada udara, sehingga memompanya melalui permukaan pernapasan membutuhkan energi yang signifikan. Oleh karena itu, sistem pernapasan ikan, yang berpusat pada insang (*gills*), adalah sebuah mahakarya rekayasa evolusioner yang dirancang untuk efisiensi maksimum dalam kondisi yang menantang ini.

Struktur dasar insang terdiri dari beberapa lengkung insang (*gill arches*) bertulang atau bertulang rawan di setiap sisi kepala, yang dilindungi oleh penutup insang atau operkulum. Setiap lengkung insang memiliki dua baris filamen insang (*gill filaments*) yang panjang dan tipis. Dari setiap filamen ini, muncul ribuan lempengan mikroskopis yang disebut lamela sekunder (*secondary lamellae*). Lamela inilah yang menjadi lokasi sebenarnya dari pertukaran gas. Strukturnya yang sangat tipis (sering kali hanya satu atau dua sel tebal) dan luas permukaannya yang sangat besar (jika dibentangkan, total luas permukaan insang seekor ikan bisa berkali-kali lipat dari luas permukaan tubuhnya) memaksimalkan laju difusi oksigen dari air ke dalam darah (Evans, Piermarini, & Choe, 2005).

Kunci efisiensi insang terletak pada sebuah mekanisme yang disebut aliran berlawanan arah (*countercurrent exchange*). Darah di dalam kapiler lamela mengalir dengan arah yang berlawanan dengan arah aliran air yang melewatinya. Saat air yang kaya oksigen pertama kali memasuki lamela, ia bertemu dengan darah yang sudah hampir jenuh dengan oksigen. Namun, saat air terus bergerak melintasi lamela dan kehilangan sebagian oksigennya, ia bertemu dengan darah yang semakin miskin oksigen. Hasilnya, di sepanjang permukaan lamela, selalu ada gradien konsentrasi yang memungkinkan oksigen terus berdifusi dari air ke darah. Mekanisme ini sangat efisien, memungkinkan ikan mengekstraksi hingga 80-90% oksigen terlarut dari air yang melewatinya, jauh lebih efisien daripada sistem aliran searah (*cocurrent flow*) (Moyle & Cech, 2004).

Dari perspektif biologi perikanan, laju konsumsi oksigen, yang dikenal sebagai laju metabolisme, adalah parameter fisiologis yang sangat penting. Laju metabolisme ini merepresentasikan “biaya hidup” seekor ikan dan menentukan berapa banyak energi dari makanan yang harus dialokasikan untuk fungsi-fungsi dasar (pemeliharaan) versus untuk pertumbuhan dan reproduksi. Laju metabolisme tidak konstan; ia sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu, tingkat aktivitas, dan ukuran tubuh. Peningkatan suhu, misalnya, akan meningkatkan laju metabolisme ikan (sebagai hewan poikilotermik atau berdarah dingin), yang berarti mereka membutuhkan lebih banyak oksigen dan makanan hanya untuk bertahan hidup.

Adaptasi terhadap Hipoksia

Hipoksia, atau kondisi kadar oksigen terlarut yang rendah, adalah fenomena yang umum terjadi di banyak ekosistem perairan, baik secara alami (misalnya, di perairan rawa yang tergenang atau di zona minimum oksigen di laut dalam) maupun akibat aktivitas manusia (eutrofikasi yang disebabkan oleh polusi nutrisi). Kemampuan suatu spesies untuk bertahan hidup dan berfungsi dalam kondisi hipoksia secara langsung menentukan batas distribusinya dan ketahanannya terhadap perubahan kualitas air. Spesies ikan telah mengembangkan serangkaian adaptasi fisiologis dan perilaku yang mengesankan untuk mengatasi tantangan ini.

Secara fisiologis, respons langsung ikan terhadap hipoksia adalah meningkatkan laju ventilasi (memompa air lebih cepat melewati insang) dan meningkatkan denyut jantung untuk mengalirkan darah lebih cepat. Namun, respons ini memakan banyak energi. Untuk mengatasi hipoksia kronis, ikan dapat melakukan penyesuaian yang lebih mendalam (aklimatisasi). Ini termasuk meningkatkan jumlah sel darah merah atau konsentrasi hemoglobin dalam darah untuk meningkatkan kapasitas angkut oksigen, serta mengubah struktur insang itu sendiri dengan meningkatkan luas permukaan lamela untuk memaksimalkan pengambilan oksigen (Nilsson & Östlund-Nilsson, 2008). Beberapa spesies bahkan dapat beralih ke metabolisme anaerobik untuk periode singkat, meskipun ini menghasilkan penumpukan asam laktat yang harus diatasi kemudian.

Secara perilaku, respons paling sederhana terhadap hipoksia adalah dengan menghindarinya, yaitu bergerak ke area dengan kadar oksigen yang lebih tinggi. Namun, jika ini tidak memungkinkan, beberapa ikan menunjukkan perilaku yang menarik. Mereka mungkin akan melakukan "pernapasan permukaan akuatik" (*aquatic surface respiration*), di mana mereka berenang tepat di bawah permukaan air untuk memanfaatkan lapisan mikro air teratas yang biasanya memiliki konsentrasi oksigen sedikit lebih tinggi karena kontak langsung dengan atmosfer.

Beberapa kelompok ikan telah berevolusi lebih jauh dengan mengembangkan organ pernapasan tambahan (*accessory respiratory organs*). Ini memungkinkan mereka untuk mengambil oksigen langsung dari udara. Contoh di Indonesia sangat melimpah. Ikan lele (famili Clariidae) memiliki organ arboresen, sebuah struktur seperti pohon yang sangat vaskular di dalam rongga insang. Ikan gabus (famili Channidae) memiliki ruang suprabranchial. Ikan gurami (famili Osphronemidae) memiliki organ labirin. Kemampuan ini memberi mereka keuntungan ekologis yang luar biasa, memungkinkan mereka untuk berkembang di habitat yang ekstrem seperti rawa-rawa, sawah, atau perairan yang tercemar berat di mana spesies ikan lain tidak dapat bertahan hidup.

Pemahaman tentang toleransi oksigen dan adaptasi pernapasan ini sangat relevan untuk pengelolaan perikanan dan akuakultur. Ia membantu memprediksi dampak zona mati (*dead zones*) hipoksia terhadap distribusi dan kelimpahan stok ikan laut. Dalam akuakultur, menjaga kadar oksigen terlarut yang optimal melalui aerasi adalah salah satu faktor terpenting untuk memastikan pertumbuhan yang sehat dan mencegah kematian massal.

2. Sistem Pencernaan dan Kaitannya dengan Kebiasaan Makanan

Setelah oksigen, kebutuhan paling mendasar bagi seekor ikan adalah energi, yang diperoleh melalui makanan. Sistem pencernaan bertanggung jawab untuk menelan, memecah (secara mekanis dan kimiawi), menyerap nutrisi dari makanan, dan membuang sisa-sisa yang tidak dapat dicerna. Struktur anatomi saluran pencernaan seekor ikan sangat berkorelasi dengan jenis makanannya (*diet*), memberikan petunjuk nyata tentang

posisinya dalam jaring-jaring makanan (tingkat trofik). Bagi ahli biologi perikanan, memahami hubungan antara anatomi pencernaan dan diet ini sangat penting, karena studi kebiasaan makanan adalah komponen kunci dalam memahami ekologi suatu spesies dan dalam membangun model ekosistem.

Secara umum, saluran pencernaan ikan terdiri dari mulut, rongga mulut, faring, esofagus, lambung, dan usus. Namun, terdapat variasi yang sangat besar dalam struktur dan panjang relatif dari komponen-komponen ini, terutama antara ikan karnivora, herbivora, dan omnivora (Jobling, 1995).

Ikan Karnivora: Ikan pemakan daging (piskivora jika memakan ikan lain, insektivora jika memakan serangga, dll.), seperti kerapu, tuna, atau barakuda, umumnya memiliki ciri-ciri pencernaan sebagai berikut:

- a. Esofagus pendek dan dapat diregangkan: Memungkinkan mereka untuk menelan mangsa yang berukuran besar, sering kali utuh.
- b. Lambung yang jelas dan elastis: Lambung berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara dan lokasi utama pencernaan protein. Dinding lambung mensekresikan asam klorida (HCl) untuk menciptakan lingkungan pH yang sangat rendah (pH 1-2) dan enzim pepsin untuk memulai pemecahan protein.
- c. Usus yang relatif pendek dan lurus: Daging relatif mudah dicerna, sehingga tidak memerlukan waktu retensi yang lama atau luas permukaan penyerapan yang sangat besar. Panjang usus sering kali kurang dari panjang tubuh ikan itu sendiri.

Ikan Herbivora: Ikan pemakan tumbuhan, seperti beberapa spesies baronang atau tawes, menghadapi tantangan yang berbeda. Materi tumbuhan, terutama alga, memiliki dinding sel selulosa yang sulit dicerna. Oleh karena itu, sistem pencernaan mereka beradaptasi untuk memaksimalkan ekstraksi nutrisi dari makanan berkualitas rendah ini:

- a. Tidak memiliki lambung sejati: Banyak ikan herbivora tidak memiliki lambung yang mensekresikan asam. Sebagai gantinya, mereka mungkin memiliki "lambung faringeal" (*pharyngeal mill*)—struktur gigi di tenggorokan—untuk menggiling dan memecah materi tumbuhan secara mekanis.

- b. Usus yang sangat panjang dan berliku-liku: Ini adalah ciri yang paling menonjol. Usus yang panjang (sering kali berkali-kali lipat dari panjang tubuh) berfungsi untuk memperpanjang waktu transit makanan, memberikan lebih banyak waktu bagi enzim-enzim (dan sering kali mikroba simbiosis di dalam usus) untuk memecah materi tumbuhan. Usus yang panjang juga secara drastis meningkatkan luas permukaan untuk penyerapan nutrisi.

Ikan Omnivora: Ikan pemakan segala, seperti ikan mas atau nila, biasanya memiliki saluran pencernaan dengan karakteristik di antara karnivora dan herbivora. Mereka umumnya memiliki usus dengan panjang menengah.

Selain struktur utama, terdapat juga organ-organ pencernaan tambahan seperti hati (*liver*) dan pankreas. Hati menghasilkan empedu yang membantu dalam pencernaan lemak, dan juga memainkan peran sentral dalam metabolisme nutrisi dan detoksifikasi. Pankreas menghasilkan berbagai enzim pencernaan yang kuat (seperti tripsin untuk protein, amilase untuk karbohidrat, dan lipase untuk lemak) yang dilepaskan ke usus. Pada banyak spesies ikan teleostei, jaringan pankreas tidak terkonsolidasi menjadi satu organ, melainkan tersebar di sepanjang mesenterium atau bahkan di dalam hati, membentuk organ gabungan yang disebut hepatopankreas.

Keterkaitan antara fisiologi pencernaan dan ekologi sangat erat. Laju pengosongan lambung (*gastric evacuation rate*), yaitu kecepatan makanan meninggalkan lambung, adalah parameter penting yang dipelajari oleh ahli biologi perikanan. Laju ini dipengaruhi oleh suhu (lebih cepat pada suhu hangat), ukuran makanan, dan jenis makanan (lemak memperlambat pengosongan). Informasi ini penting untuk memperkirakan laju konsumsi makanan harian seekor ikan di alam liar, sebuah parameter kunci untuk model bioenergetika dan model ekosistem (Andersen, 2012).

Studi tentang enzim-enzim pencernaan (analisis zimogram) juga dapat memberikan wawasan kuantitatif tentang diet. Misalnya, rasio aktivitas enzim protease (seperti tripsin) terhadap amilase dapat menjadi indikator tingkat karnivori suatu spesies. Ikan karnivora akan menunjukkan aktivitas

protease yang tinggi dan amilase yang rendah, sementara yang sebaliknya berlaku untuk ikan herbivora.

Dalam konteks praktis, pemahaman ini sangat vital. Dalam pengembangan pakan untuk akuakultur, misalnya, formulasi pakan harus disesuaikan dengan kemampuan pencernaan spesies target. Memberikan pakan tinggi protein kepada spesies herbivora tidak hanya tidak efisien secara ekonomi, tetapi juga dapat menyebabkan masalah kesehatan. Dalam analisis ekologis, dengan hanya melihat anatomi usus seekor ikan yang belum pernah dipelajari sebelumnya, seorang ilmuwan sudah dapat membuat hipotesis yang kuat tentang kemungkinan jenis makanannya, yang kemudian dapat diverifikasi melalui analisis isi usus. Ini menunjukkan betapa eratnya hubungan antara bentuk (anatomi) dan fungsi (fisiologi) dalam menentukan peran ekologis suatu organisme.

3. Sistem Sirkulasi, Saraf, dan Endokrin sebagai Dasar Respon Fisiologis

Jika sistem pernapasan menyediakan oksigen dan sistem pencernaan menyediakan bahan bakar (nutrien), maka sistem sirkulasi (peredaran darah) adalah jaringan transportasi yang mengantarkan keduanya ke seluruh sel tubuh, sambil secara bersamaan mengangkut produk limbah metabolik (seperti karbon dioksida dan amonia) ke organ ekskresi (insang dan ginjal). Jantung ikan adalah pompa utama dalam sistem ini. Berbeda dengan mamalia, ikan memiliki sistem peredaran darah tunggal dan tertutup. Jantung hanya terdiri dari dua ruang utama: satu atrium dan satu ventrikel. Darah miskin oksigen dari seluruh tubuh masuk ke atrium, dipompa ke ventrikel, dan kemudian dipompa dengan kuat menuju insang. Setelah mengambil oksigen di insang, darah yang kaya oksigen tidak kembali ke jantung, melainkan langsung didistribusikan ke seluruh tubuh melalui aorta dorsal. Sistem ini, meskipun lebih sederhana daripada sistem peredaran darah ganda pada vertebrata darat, sangat efisien untuk kehidupan di air (Farrell & Jones, 1992).

Darah itu sendiri terdiri dari plasma dan sel-sel darah. Sel darah merah mengandung hemoglobin, protein pengikat oksigen yang memberikan warna merah pada darah. Afinitas (daya ikat) hemoglobin terhadap oksigen

dapat bervariasi antar spesies dan dapat berubah sebagai respons terhadap kondisi lingkungan. Misalnya, ikan yang hidup di lingkungan hipoksia sering kali memiliki hemoglobin dengan afinitas yang lebih tinggi terhadap oksigen, memungkinkannya untuk “mengambil” oksigen bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah.

Sementara sistem sirkulasi adalah sistem transportasi, sistem saraf dan sistem endokrin (hormonal) adalah dua sistem komunikasi dan kontrol utama yang mengatur semua proses fisiologis dan perilaku ikan. Keduanya bekerja sama untuk memungkinkan ikan merespons rangsangan dari lingkungan internal dan eksternal.

Sistem Saraf menyediakan respons yang cepat dan langsung terhadap rangsangan. Ia terdiri dari sistem saraf pusat (otak dan sumsum tulang belakang) dan sistem saraf tepi (saraf yang menghubungkan pusat ke seluruh tubuh). Melalui organ-organ indera yang canggih—seperti mata (penglihatan), telinga dalam dan gurat sisi (pendengaran dan persepsi getaran air), serta lubang hidung (penciuman)—ikan terus-menerus memantau lingkungannya. Informasi ini diproses di otak, yang kemudian mengirimkan sinyal melalui saraf motorik ke otot untuk menghasilkan respons perilaku yang sesuai, seperti melarikan diri dari predator, mendekati mangsa, atau berinteraksi dengan pasangan kawin.

Sistem Endokrin, di sisi lain, mengatur respons yang lebih lambat namun berlangsung lebih lama melalui pelepasan hormon ke dalam aliran darah. Hormon adalah pembawa pesan kimiawi yang diproduksi oleh kelenjar endokrin (seperti hipofisis, tiroid, dan gonad). Mereka mengatur berbagai proses fundamental, termasuk:

- a. Pertumbuhan: Hormon pertumbuhan (*growth hormone*) yang diproduksi oleh kelenjar hipofisis adalah regulator utama pertumbuhan somatik.
- b. Keseimbangan Osmotik (Osmoregulasi): Hormon seperti kortisol dan prolaktin sangat penting dalam mengatur keseimbangan garam dan air, sebuah tantangan besar bagi ikan air tawar (yang cenderung kemasukan air) dan ikan air laut (yang cenderung kehilangan air).

- c. Reproduksi: Seluruh siklus reproduksi, mulai dari pematangan gonad (gametogenesis), perilaku kawin, hingga pelepasan telur dan sperma (pemijahan), diatur oleh kaskade hormon yang kompleks yang dikenal sebagai sumbu otak-hipofisis-gonad (*brain-pituitary-gonad axis*).
- d. Respons Stres: Ketika ikan menghadapi stresor (misalnya, dikejar predator, perubahan suhu mendadak, atau penanganan oleh manusia), kelenjar adrenal akan melepaskan hormon stres seperti kortisol dan adrenalin. Hormon-hormon ini memobilisasi cadangan energi dan mempersiapkan tubuh untuk respons "lawan atau lari" (*fight or flight*). Namun, stres kronis yang menyebabkan kadar kortisol tinggi secara terus-menerus dapat menekan sistem kekebalan tubuh, menghambat pertumbuhan, dan mengganggu reproduksi (Barton, 2002).

Bagi ahli biologi perikanan, pemahaman tentang sistem kontrol ini sangatlah penting. Misalnya, analisis hormon reproduksi (seperti testosteron atau estradiol) dalam sampel darah dapat digunakan sebagai indikator yang lebih presisi tentang status kematangan gonad dibandingkan hanya pengamatan visual. Demikian pula, pengukuran kadar kortisol dapat digunakan sebagai biomarker kuantitatif untuk tingkat stres yang dialami ikan akibat praktik penangkapan atau kondisi lingkungan yang buruk.

C. Taksonomi dan Klasifikasi Ikan Ekonomis Penting Indonesia

Setelah memahami bagaimana individu ikan berfungsi melalui studi morfologi, anatomi, dan fisiologi, langkah selanjutnya yang tidak kalah pentingnya adalah kemampuan untuk memberi nama dan mengelompokkan ikan secara benar. Inilah ranah taksonomi dan sistematika. Taksonomi adalah ilmu penamaan, pendeskripsian, dan pengklasifikasian organisme. Sistematika memiliki cakupan yang lebih luas, yaitu studi tentang keanekaragaman organisme dan hubungan evolusioner di antara mereka. Bagi seorang ahli biologi perikanan, taksonomi bukanlah sekadar aktivitas akademis yang kering; ia adalah fondasi dari semua pekerjaan selanjutnya.

Kesalahan dalam identifikasi spesies dapat menyebabkan konsekuensi yang fatal dalam pengelolaan perikanan. Data pendaratan ikan yang mencampurkan beberapa spesies berbeda di bawah satu nama umum akan menghasilkan penilaian stok yang tidak akurat dan menyesatkan.

Sebagai contoh, jika dua spesies ikan kerapu yang berbeda—satu tumbuh cepat dan tahan terhadap tekanan penangkapan, yang lain tumbuh lambat dan rentan—keduanya dicatat hanya sebagai “kerapu”, maka kebijakan pengelolaan yang dibuat berdasarkan data gabungan tersebut kemungkinan besar akan menyebabkan kepunahan lokal pada spesies yang lebih rentan (Sadovy de Mitcheson et al., 2013).

Oleh karena itu, penguasaan prinsip-prinsip dasar taksonomi dan kemampuan untuk mengidentifikasi spesies ikan ekonomis penting secara akurat adalah kompetensi inti yang harus dimiliki. Indonesia, sebagai pusat keanekaragaman hayati laut dunia, memiliki ribuan spesies ikan, banyak di antaranya menjadi target penangkapan. Kemampuan untuk menavigasi keanekaragaman ini adalah prasyarat untuk pengelolaan perikanan yang efektif di tingkat nasional maupun lokal.

1. Prinsip Dasar Taksonomi, Sistematika, dan Nomenklatur Ikan

Sistem klasifikasi modern yang kita gunakan saat ini berakar pada karya monumental Carolus Linnaeus pada abad ke-18. Sistem ini bersifat hierarkis, artinya organisme dikelompokkan ke dalam tingkatan-tingkatan (taksa, tunggal: takson) yang semakin inklusif. Urutan hierarki utama dari yang paling spesifik hingga yang paling umum adalah: Spesies, Genus, Famili, Ordo, Kelas, Filum, Kerajaan.

- a. Spesies: Merupakan unit dasar taksonomi. Konsep spesies biologis mendefinisikan spesies sebagai sekelompok individu yang secara aktual atau potensial dapat saling kawin di alam dan menghasilkan keturunan yang subur. Setiap spesies diberi nama ilmiah unik yang terdiri dari dua bagian (tata nama binomial), yang ditulis dalam bahasa Latin dan dicetak miring. Contoh: *Thunnus albacares*.
- b. Genus: Merupakan kumpulan dari spesies-spesies yang berkerabat sangat dekat dan berbagi nenek moyang langsung yang sama. Bagian pertama dari nama ilmiah adalah nama genus. Contoh: Genus *Thunnus* mencakup berbagai spesies tuna seperti *Thunnus albacares* (tuna sirip kuning), *Thunnus obesus* (tuna mata besar), dan *Thunnus maccoyii* (tuna sirip biru selatan).

- c. Famili: Merupakan kumpulan dari genus-genus yang berkerabat. Nama famili biasanya diakhiri dengan "-idae". Contoh: Genus *Thunnus*, *Katsuwonus* (cakalang), dan *Euthynnus* (tongkol) semuanya termasuk dalam famili Scombridae, yang mencakup semua jenis tuna, tongkol, dan makarel.
- d. Ordo: Merupakan kumpulan dari famili-famili yang berkerabat. Nama ordo biasanya diakhiri dengan "-formes". Contoh: Famili Scombridae termasuk dalam ordo Scombriformes.
- e. Kelas: Merupakan tingkatan yang lebih tinggi. Sebagian besar ikan bertulang yang kita kenal termasuk dalam kelas *Actinopterygii* (ikan bersirip pari-pari), sementara hiu dan pari termasuk dalam kelas *Chondrichthyes* (ikan bertulang rawan).

Proses identifikasi spesies ikan di lapangan atau di laboratorium biasanya melibatkan penggunaan kunci identifikasi (*identification key*). Kunci ini berupa serangkaian pertanyaan dikotomis (dua pilihan) tentang ciri-ciri morfologis atau meristik ikan. Dengan menjawab setiap pertanyaan secara berurutan, pengguna akan dituntun menuju nama spesies yang benar. Ciri-ciri yang umum digunakan dalam kunci identifikasi ikan meliputi bentuk tubuh, ada atau tidaknya sisik, jenis sisik (sisik sikloid atau stenoid), jumlah dan posisi sirip, jumlah jari-jari sirip keras dan lunak, bentuk mulut, dan pola warna.

Penting untuk diingat bahwa taksonomi adalah ilmu yang dinamis. Seiring dengan berkembangnya teknik-teknik baru, terutama analisis DNA (genetika molekuler), hubungan evolusioner antar kelompok ikan menjadi semakin jelas. Hal ini sering kali mengarah pada revisi taksonomi, di mana suatu spesies mungkin dipindahkan ke genus yang berbeda, atau suatu kelompok yang sebelumnya dianggap sebagai satu spesies ternyata terdiri dari beberapa spesies kriptik (spesies yang secara morfologis identik tetapi secara genetik berbeda). Oleh karena itu, seorang ahli biologi perikanan harus terus memperbarui pengetahuannya sesuai dengan perkembangan terbaru dalam sistematika ikan.

2. Identifikasi dan Klasifikasi Famili Ikan Pelagis dan Demersal Utama di Perairan Indonesia

Perairan Indonesia yang sangat luas menjadi rumah bagi dua kelompok besar ikan berdasarkan habitat utamanya: ikan pelagis dan ikan demersal. Pemahaman mengenai famili-famili utama dalam kedua kelompok ini adalah pengetahuan dasar yang esensial.

a. Ikan Pelagis

Ikan pelagis adalah ikan yang hidup di kolom air, jauh dari dasar laut. Mereka sering kali merupakan perenang aktif dan melakukan migrasi jarak jauh. Ikan pelagis dapat dibagi lagi menjadi dua sub-kelompok:

- 1) Pelagis Kecil: Umumnya berukuran lebih kecil, membentuk gerombolan (*school*) besar, dan memakan plankton atau ikan yang lebih kecil. Mereka merupakan komponen vital dalam jaring-jaring makanan laut dan menjadi target perikanan skala besar. Famili utama di Indonesia meliputi:
 - (a) Clupeidae: Mencakup berbagai jenis sardin, tembang, dan terubuk. Ciri khasnya adalah tubuh yang pipih (*compressiform*), sisik sikloid yang mudah lepas, dan sering kali memiliki sisik tajam di bagian bawah perut yang disebut "*scutes*". Contoh: *Sardinella lemuru* (ikan lemuru), *Sardinella fimbriata* (tembang).
 - (b) Engraulidae: Dikenal sebagai ikan teri atau bilis. Umumnya berukuran sangat kecil, dengan moncong yang menonjol dan mulut inferior yang lebar. Sangat penting secara ekonomi baik untuk konsumsi manusia maupun sebagai bahan baku pakan ikan. Contoh: Genus *Stolephorus* dan *Encrasicholina*.
 - (c) Scombridae (kelompok makerel): Mencakup ikan kembung dan sejenisnya. Tubuh fusiform, dengan serangkaian sirip kecil (*finlets*) di belakang sirip punggung dan sirip dubur. Contoh: Genus *Rastrelliger* (kembung lelaki dan kembung perempuan).
 - (d) Carangidae (sebagian): Beberapa anggota famili ini bersifat pelagis, seperti ikan selar dan layang. Tubuhnya bervariasi tetapi umumnya *compressiform*, sering kali dengan sisik yang menebal dan keras di

dekat pangkal ekor (*scutes*). Contoh: *Decapterus russelli* (layang), *Selar crumenophthalmus* (selar bentong).

- 2) Pelagis Besar: Merupakan predator puncak di lautan terbuka, berukuran besar, perenang cepat, dan memiliki nilai ekonomi sangat tinggi.
 - (a) Scombridae (kelompok tuna): Ini adalah famili paling ikonik dari ikan pelagis besar. Tubuh fusiform sempurna untuk kecepatan, dengan sirip dada yang dapat dilipat ke dalam lekukan tubuh untuk mengurangi hambatan. Termasuk di dalamnya adalah tuna, cakalang, dan tongkol. Contoh: *Thunnus albacares* (tuna sirip kuning/madidihang), *Katsuwonus pelamis* (cakalang), *Euthynnus affinis* (tongkol).
 - (b) Xiphiidae dan Istiophoridae: Dikenal sebagai ikan berparuh (*billfishes*). Memiliki rahang atas yang memanjang membentuk "pedang" (pada *swordfish*, famili Xiphiidae) atau "tombak" bulat (pada marlin dan layaran, famili Istiophoridae). Merupakan target utama perikanan rekreasi dan komersial. Contoh: *Istiophorus platypterus* (layaran).

b. Ikan Demersal

Ikan demersal adalah ikan yang hidup di atau dekat dasar perairan. Gaya hidup mereka lebih sering menetap (*sedentary*) dibandingkan ikan pelagis, meskipun beberapa spesies juga melakukan migrasi. Keanekaragaman ikan demersal di Indonesia sangat tinggi, terutama di sekitar ekosistem terumbu karang dan dasar laut yang lunak.

- 1) Ikan Terumbu Karang dan Perairan Dangkal:
 - (a) Serranidae: Famili yang sangat penting, mencakup semua jenis kerapu dan beberapa jenis bass laut. Umumnya merupakan predator penyergap dengan mulut besar dan tubuh yang kekar. Banyak spesiesnya bersifat hermafrodit (dapat berganti kelamin). Sangat bernilai ekonomi tinggi dan rentan terhadap penangkapan berlebih. Contoh: *Epinephelus coioides* (kerapu lumpur), *Plectropomus leopardus* (kerapu sunu).
 - (b) Lutjanidae: Dikenal sebagai ikan kakap atau *snapper*. Merupakan predator aktif di sekitar terumbu karang dan dasar keras. Ciri

khasnya adalah gigi taring (*canine teeth*) yang kuat. Contoh: *Lutjanus malabaricus* (kakap merah), *Lutjanus johnii* (jenaha).

- (c) Lethrinidae: Dikenal sebagai ikan lencam atau *emperor*. Memiliki bibir tebal dan gigi geraham (*molariform teeth*) yang kuat untuk menghancurkan mangsa bercangkang keras seperti moluska dan krustasea. Contoh: *Lethrinus nebulosus* (lencam).
- (d) Siganidae: Dikenal sebagai ikan baronang atau *rabbitfish*. Umumnya herbivora, memakan alga di terumbu karang. Memiliki duri berbisa di siripnya sebagai mekanisme pertahanan. Contoh: *Siganus guttatus* (baronang).

2) Ikan Dasar Laut Lunak (Pasir/Lumpur):

- (a) Nemipteridae: Dikenal sebagai ikan kurisi atau kerandang. Umumnya hidup di dasar pasir atau lumpur, memakan invertebrata bentik. Sering kali berwarna kemerahan atau merah muda. Contoh: Genus *Nemipterus*.
- (b) Sciaenidae: Dikenal sebagai ikan gulamah atau kerot. Memiliki kemampuan untuk menghasilkan suara menggunakan otot khusus yang menggetarkan gelembung renang. Sering ditemukan di perairan pesisir yang keruh dan estuari. Contoh: Genus *Johnius*.
- (c) Mullidae: Dikenal sebagai ikan biji nangka atau *goatfish*. Ciri khasnya adalah sepasang sungut (*barbels*) di dagu yang sangat sensitif dan digunakan untuk mendeteksi mangsa (invertebrata kecil) di dalam sedimen. Contoh: Genus *Upeneus*.

Kemampuan untuk mengenali famili-famili kunci ini dan beberapa genus atau spesies representatif di dalamnya adalah langkah pertama yang krusial bagi setiap mahasiswa atau praktisi biologi perikanan di Indonesia. Ini adalah "kosakata" dasar yang memungkinkan komunikasi ilmiah yang jelas dan menjadi fondasi untuk studi yang lebih mendalam tentang aspek-aspek biologi lainnya.

Keberlangsungan hidup suatu populasi ikan, dalam jangka panjang, bergantung pada satu proses biologis yang fundamental: reproduksi. Kemampuan suatu populasi untuk menggantikan individu-individu yang hilang akibat mortalitas alami maupun penangkapan adalah inti dari konsep kelestarian sumber daya. Jika laju penambahan individu baru melalui reproduksi (rekrutmen) secara konsisten lebih rendah daripada laju kehilangan individu, maka populasi tersebut ditakdirkan untuk menyusut dan pada akhirnya kolaps. Oleh karena itu, studi tentang biologi reproduksi bukan hanya merupakan cabang ilmu yang menarik, tetapi juga menjadi pilar utama dalam biologi perikanan.

Informasi yang diperoleh dari studi reproduksi memiliki aplikasi langsung dan krusial dalam pengelolaan perikanan. Dengan mengetahui kapan dan di mana ikan memijah, manajer dapat merancang penutupan musim atau daerah penangkapan untuk melindungi agregasi pemijahan. Dengan mengetahui pada ukuran berapa ikan pertama kali matang gonad, manajer dapat menetapkan batas ukuran minimum ikan yang boleh ditangkap untuk memastikan setiap individu memiliki kesempatan untuk berkontribusi pada generasi berikutnya. Analisis fekunditas (jumlah telur yang dihasilkan) membantu dalam memahami potensi reproduktif suatu stok dan menjadi masukan penting untuk model-model hubungan stok-rekrutmen.

Bab ini akan mengupas tuntas berbagai aspek biologi reproduksi ikan yang relevan untuk pengelolaan. Kita akan memulai dari struktur organ reproduksi dan proses pembentukan sel kelamin, kemudian beralih ke metode praktis untuk menilai tingkat kematangan gonad di lapangan. Selanjutnya, kita akan membahas konsep fekunditas dan berbagai strategi pemijahan yang diadopsi oleh ikan, yang semuanya merupakan adaptasi

untuk memaksimalkan keberhasilan reproduksi di lingkungan yang sering kali tidak dapat diprediksi.

A. Organ Reproduksi, Gametogenesis, dan Diferensiasi Seksual

Dasar dari reproduksi seksual adalah produksi sel kelamin atau gamet—sperma pada jantan dan sel telur (ovum) pada betina—yang terjadi di dalam organ reproduksi primer yang disebut gonad. Pada ikan, gonad jantan disebut testis, dan gonad betina disebut ovarium. Umumnya, ikan memiliki sepasang gonad (testis atau ovarium) yang terletak di bagian atas rongga tubuh, tepat di bawah gelembung renang dan di atas saluran pencernaan. Ukuran, bentuk, dan warna gonad dapat bervariasi secara dramatis tergantung pada spesies, jenis kelamin, dan yang terpenting, tahap kematangan seksual ikan tersebut.

Pada ikan yang belum matang secara seksual (imatur), gonad sering kali berukuran sangat kecil, transparan, dan seperti benang, sehingga sulit untuk dibedakan antara jantan dan betina hanya dengan pengamatan mata telanjang. Seiring dengan perkembangan menuju kematangan seksual, gonad akan membesar secara signifikan. Ovarium pada ikan betina yang matang biasanya akan terisi penuh dengan ribuan hingga jutaan sel telur yang dapat terlihat, memberikan tekstur granular dan warna yang bervariasi dari kekuningan hingga oranye. Sebaliknya, testis pada ikan jantan yang matang akan membengkak, berwarna keputihan seperti susu, dan memiliki tekstur yang halus. Ketika dipijat, testis matang akan mengeluarkan cairan sperma (milt).

Struktur gonad ini secara langsung berkaitan dengan fungsinya dalam proses gametogenesis, yaitu proses pembentukan gamet melalui pembelahan sel meiosis. Gametogenesis pada jantan disebut spermatogenesis, dan pada betina disebut oogenesis.

Spermatogenesis (Pembentukan Sperma) Proses ini terjadi di dalam ribuan tubulus seminiferus yang menyusun testis. Prosesnya dimulai dari sel induk sperma yang disebut spermatogonium. Spermatogonium (diploid, $2n$) akan membelah secara mitosis untuk memperbanyak diri, dan kemudian tumbuh menjadi spermatosit primer (diploid, $2n$). Setiap spermatosit primer

kemudian menjalani pembelahan meiosis pertama untuk menghasilkan dua spermatosit sekunder (haploid, n). Masing-masing spermatosit sekunder ini kemudian menjalani pembelahan meiosis kedua, menghasilkan total empat sel spermatid (haploid, n). Tahap terakhir adalah spermiogenesis, di mana spermatid mengalami transformasi morfologis (tanpa pembelahan lebih lanjut) menjadi spermatozoa yang fungsional, yang terdiri dari kepala (mengandung materi genetik), bagian tengah (mengandung mitokondria untuk energi), dan ekor (flagellum) untuk pergerakan. Seluruh proses ini terjadi secara berkelanjutan pada ikan jantan yang aktif secara seksual (Schulz et al., 2010).

Oogenesis (Pembentukan Sel Telur) Oogenesis adalah proses yang jauh lebih kompleks dan memakan waktu lebih lama dibandingkan spermatogenesis. Proses ini dimulai dari sel induk telur yang disebut oogonium (diploid, $2n$) di dalam ovarium. Oogonium membelah secara mitosis dan kemudian tumbuh menjadi oosit primer (diploid, $2n$). Oosit primer kemudian memulai pembelahan meiosis pertama, tetapi proses ini berhenti pada tahap profase I untuk waktu yang lama. Selama periode "istirahat" ini, oosit primer mengalami fase pertumbuhan yang luar biasa, yang dikenal sebagai vitelogenesis.

Vitelogenesis adalah proses akumulasi kuning telur (*yolk*) di dalam sitoplasma oosit. Kuning telur adalah cadangan nutrisi (terutama protein yang disebut vitelogenin dan lipid) yang akan digunakan oleh embrio untuk pertumbuhannya setelah pembuahan. Vitelogenin sebenarnya tidak diproduksi di ovarium, melainkan disintesis di hati di bawah stimulasi hormon estrogen, kemudian diangkut oleh darah ke ovarium dan diserap oleh oosit yang sedang berkembang. Proses inilah yang menyebabkan pembesaran ovarium secara masif dan perubahan warnanya menjadi kekuningan. Setelah vitelogenesis selesai, oosit primer yang telah tumbuh maksimal akan melanjutkan dan menyelesaikan meiosis I, menghasilkan satu oosit sekunder yang besar (haploid, n) dan satu badan polar pertama yang kecil. Oosit sekunder kemudian memulai meiosis II, tetapi kembali berhenti pada tahap metafase II. Pada tahap inilah oosit diovulasikan (dilepaskan dari folikel) dan siap untuk dibuahi. Penyelesaian meiosis II baru akan terjadi jika ada penetrasi oleh sperma (Nagahama, 1983).

Diferensiasi Seksual

Diferensiasi seksual adalah proses di mana gonad yang pada awalnya tidak berdiferensiasi pada tahap larva atau yuwana berkembang menjadi testis atau ovarium. Mekanisme penentuan jenis kelamin pada ikan sangat beragam dan fleksibel, jauh lebih bervariasi daripada pada mamalia atau burung. Secara umum, jenis kelamin dapat ditentukan oleh faktor genetik, faktor lingkungan, atau interaksi keduanya (Devlin & Nagahama, 2002).

1. Penentuan Jenis Kelamin Genetik (*Genetic Sex Determination - GSD*): Mirip dengan vertebrata lain, jenis kelamin ditentukan oleh kromosom seks. Sistem yang umum ditemukan adalah sistem XY (jantan heterogametik, seperti pada mamalia) atau sistem ZW (betina heterogametik, seperti pada burung). Namun, banyak juga ikan yang tidak memiliki kromosom seks yang dapat dibedakan secara visual, dan penentuan jenis kelamin dikendalikan oleh beberapa gen (*polygenic*).
2. Penentuan Jenis Kelamin oleh Lingkungan (*Environmental Sex Determination - ESD*): Pada beberapa spesies, jenis kelamin tidak ditentukan oleh gen, melainkan oleh faktor lingkungan yang dialami selama periode perkembangan awal yang kritis. Faktor lingkungan yang paling umum berpengaruh adalah suhu. Pada beberapa spesies, suhu inkubasi yang lebih tinggi menghasilkan lebih banyak jantan, sementara pada spesies lain, suhu yang lebih tinggi justru menghasilkan lebih banyak betina. Fenomena ini memiliki implikasi penting di era perubahan iklim, di mana pemanasan global berpotensi mengubah rasio jenis kelamin alami suatu populasi.
3. Hermafroditisme (*Hermaphroditism*): Fenomena yang paling menarik dan umum ditemukan pada ikan adalah hermafroditisme, di mana satu individu dapat berfungsi sebagai jantan dan betina, baik secara bersamaan maupun berurutan.
 - a. Hermafrodit Sinkroni (*Synchronous Hermaphroditism*): Individu memiliki jaringan ovarium dan testis yang fungsional pada saat yang sama dan secara teori dapat menghasilkan sperma dan sel telur. Namun, pembuahan sendiri (*self-fertilization*) sangat jarang terjadi di alam.

- b. Hermafrodit Berurutan (Sequential Hermaphroditism): Individu memulai hidupnya sebagai satu jenis kelamin dan kemudian berganti menjadi jenis kelamin yang lain. Ini adalah strategi yang sangat umum, terutama pada ikan-ikan terumbu karang.
- 1) Protogini (*Protogynous Hermaphroditism*): Individu lahir sebagai betina dan kemudian berubah menjadi jantan. Ini adalah bentuk hermafroditisme yang paling umum. Strategi ini menguntungkan dalam sistem sosial di mana jantan besar dan dominan dapat memonopoli pemijahan dengan banyak betina (sistem harem). Banyak spesies kerapu (*Serranidae*) dan kakap (*Lutjanidae*) adalah hermafrodit protogini.
 - 2) Protandri (*Protandrous Hermaphroditism*): Individu lahir sebagai jantan dan kemudian berubah menjadi betina. Strategi ini lebih jarang, tetapi ditemukan pada ikan badut (*clownfish*). Dalam sistem sosial ikan badut, betina terbesar akan berpasangan dengan jantan terbesar, dan jika betina tersebut mati, jantan pasangannya akan berubah menjadi betina.

Pemahaman tentang strategi seksual ini sangat penting untuk pengelolaan. Misalnya, pada spesies protogini seperti kerapu, penangkapan yang secara selektif menargetkan ikan-ikan berukuran besar akan secara tidak proporsional menghilangkan jantan dari populasi, yang dapat menyebabkan kegagalan pembuahan dan menurunkan keberhasilan reproduksi secara keseluruhan (Alonzo, 2010).

B. Analisis Kematangan Gonad

Salah satu kegiatan rutin yang paling fundamental dalam riset biologi perikanan adalah analisis tingkat kematangan gonad. Tujuannya adalah untuk menentukan pada tahap perkembangan reproduksi manakah seekor ikan berada pada saat ditangkap. Informasi ini, ketika dikumpulkan dari banyak individu sepanjang tahun, memungkinkan para ilmuwan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan kunci: Pada ukuran atau umur berapa ikan pertama kali matang secara seksual? Kapan puncak musim pemijahan terjadi? Di manakah lokasi pemijahan utama? Jawaban atas pertanyaan-

pertanyaan ini adalah landasan untuk merumuskan regulasi pengelolaan yang efektif seperti yang telah dibahas sebelumnya.

Analisis kematangan gonad dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan, mulai dari metode visual yang cepat dan sederhana di lapangan, hingga analisis histologis yang detail di laboratorium. Metode-metode ini sering kali dilengkapi dengan perhitungan indeks kuantitatif untuk memberikan ukuran yang lebih objektif dari status reproduksi.

1. Penentuan Tingkat Kematangan Gonad (TKG) secara Morfologis dan Histologis

a. Penentuan TKG secara Morfologis (*Makroskopis*)

Metode ini adalah yang paling umum digunakan dalam survei perikanan karena cepat, murah, dan tidak memerlukan peralatan canggih. Penentuan TKG secara morfologis didasarkan pada pengamatan visual terhadap serangkaian perubahan ciri-ciri gonad seiring dengan perkembangannya. Ciri-ciri yang diamati meliputi ukuran relatif gonad terhadap rongga tubuh, bentuk, warna, tingkat vaskularisasi (jumlah pembuluh darah yang terlihat), dan pada ovarium, kenampakan sel telur (apakah transparan, buram, atau dapat dilihat sebagai butiran individu).

Meskipun skema klasifikasi dapat bervariasi antar peneliti dan antar spesies, sebagian besar skema TKG mengikuti pola umum yang membagi siklus reproduksi menjadi beberapa tahap diskrit. Skema lima tahap yang umum digunakan adalah sebagai berikut (diadaptasi dari Wallace & Selman, 1981; West, 1990):

1) Tahap I: Imatur (*Immature*) atau Dara (*Virgin*):

Ovarium & Testis: Gonad berukuran sangat kecil, seperti benang, transparan, dan menempati sebagian kecil rongga tubuh. Jenis kelamin sering kali sulit atau tidak mungkin dibedakan dengan mata telanjang. Tidak ada vaskularisasi yang terlihat. Pada ovarium, sel telur tidak terlihat.

2) Tahap II: Berkembang (*Developing*) atau Istirahat (*Resting*):

(a) Ovarium: Mulai membesar, berwarna kekuningan atau merah muda. Ukurannya sekitar sepertiga hingga setengah dari rongga

tubuh. Sel telur individual mulai terlihat sebagai butiran-butiran kecil yang buram (opak). Vaskularisasi mulai tampak. Tahap ini juga mencakup ikan yang telah selesai memijah dan gonadnya sedang dalam proses pemulihan untuk siklus berikutnya (disebut juga tahap *recovering spent*).

- (b) Testis: Mulai membesar, berwarna keputihan atau kemerahan. Tidak lagi seperti benang tetapi sudah berbentuk pipih.
- 3) Tahap III: Matang (*Maturing* atau *Ripe*):
 - (a) Ovarium: Berukuran sangat besar, menempati lebih dari dua pertiga rongga tubuh. Warna menjadi lebih intens (kuning tua atau oranye). Sel telur terlihat jelas, berbentuk bulat, opak, dan mengisi seluruh ovarium. Vaskularisasi sangat jelas.
 - (b) Testis: Berwarna putih susu, berukuran besar dan menggembung. Jika dipijat perlahan, akan mengeluarkan sedikit cairan sperma (milt).
- 4) Tahap IV: Memijah (*Spawning* atau *Ripe and Running*):
 - (a) Ovarium: Mencapai ukuran maksimum. Beberapa sel telur mungkin sudah menjadi transparan (terhidrasi) dan matang sempurna, siap untuk diovolasikan. Jika perut ikan dipijat dengan hati-hati, sel telur matang dapat keluar melalui lubang genital. Ovarium sangat lunak dan rapuh.
 - (b) Testis: Berwarna putih pekat dan sangat menggembung. Cairan sperma akan mengalir keluar dengan mudah hanya dengan sedikit tekanan pada perut.
- 5) Tahap V: Salin (*Spent*):
 - (a) Ovarium: Tampak kempis, lembek, dan kendur. Dinding ovarium longgar dan berwarna kemerahan atau keunguan karena pendarahan internal setelah ovulasi. Mungkin masih terdapat beberapa sisa sel telur matang yang tidak terovulasi (residu).
 - (b) Testis: Juga tampak kempis, kendur, dan berwarna kemerahan. Ukurannya menyusut drastis dibandingkan tahap IV.

Meskipun sangat praktis, metode morfologis memiliki keterbatasan. Ia bersifat subjektif dan memerlukan pengalaman serta konsistensi dari

pengamat. Sering kali sulit untuk membedakan secara jelas antara tahap-tahap yang berdekatan (misalnya, antara akhir Tahap II dan awal Tahap III). Selain itu, pada ikan yang memijah berkali-kali dalam satu musim (*batch spawner*), ovarium dapat mengandung sel telur dari berbagai tahap perkembangan secara bersamaan, yang membuat klasifikasi ke dalam satu tahap tunggal menjadi sulit.

b. Penentuan TKG secara Histologis (Mikroskopis)

Untuk mengatasi subjektivitas dan mendapatkan gambaran yang lebih akurat tentang status reproduksi, analisis histologis dapat dilakukan. Metode ini melibatkan pengambilan sampel kecil dari jaringan gonad, yang kemudian diawetkan, diiris sangat tipis menggunakan mikrotom, diwarnai dengan pewarna khusus, dan diamati di bawah mikroskop.

Analisis histologis memungkinkan identifikasi langsung dari jenis-jenis sel gamet pada berbagai tahap perkembangannya. Pada ovarium, seorang ahli histologi dapat membedakan antara:

- 1) Oosit Kromatin-Nukleolus (*Chromatin-Nucleolus Stage*): Oosit paling awal, dengan sitoplasma yang sedikit dan nukleus yang besar.
- 2) Oosit Perinukleolus (*Perinucleolus Stage*): Oosit mulai tumbuh, dengan nukleolus yang berjejer di tepi nukleus.
- 3) Oosit Vitelogenik Awal (*Cortical Alveoli* atau *Yolk Vesicle Stage*): Tetesan-tetesan kecil (vesikel kuning telur) mulai muncul di sitoplasma. Ini adalah awal dari vitelogenesis.
- 4) Oosit Vitelogenik Akhir (*Yolk Granule Stage*): Butiran-butiran kuning telur yang sebenarnya (protein) mulai mengisi sitoplasma, membuat oosit menjadi opak.
- 5) Oosit Matang (*Mature Oocyte*): Butiran kuning telur menyatu, dan nukleus bermigrasi ke tepi sel (migrasi vesikel germinal).
- 6) Folikel Pasca-Ovulasi (*Post-Ovulatory Follicles* - POFs): Struktur sisa yang terlipat setelah oosit matang diovulasikan. Kehadiran POFs adalah bukti definitif bahwa pemijahan baru saja terjadi.
- 7) Folikel Atretik (*Atretic Follicles*): Oosit yang gagal berkembang atau tidak diovulasikan dan sedang dalam proses diserap kembali oleh tubuh.

Dengan melihat proporsi dari berbagai jenis sel ini, klasifikasi TKG dapat dibuat dengan tingkat akurasi dan objektivitas yang jauh lebih tinggi. Analisis histologis adalah "standar emas" (*gold standard*) dalam studi reproduksi. Ia sangat penting untuk memvalidasi skala TKG morfologis, untuk mengidentifikasi secara pasti musim pemijahan (dengan adanya POFs), dan untuk mempelajari strategi pemijahan (misalnya, membedakan antara *total spawner* dan *batch spawner*) (Hunter & Macewicz, 1985). Namun, metode ini mahal, memakan waktu, dan membutuhkan keahlian teknis yang tinggi, sehingga tidak selalu praktis untuk analisis sampel dalam jumlah besar.

2. Indeks Kematangan Gonad (IKG) dan Indeks Hepatosomatik (HSI) sebagai Indikator Kesiapan Memijah

Selain klasifikasi TKG kualitatif, ahli biologi perikanan sering kali menggunakan indeks kuantitatif untuk melacak perkembangan gonad. Indeks yang paling umum digunakan adalah Indeks Kematangan Gonad (IKG), juga dikenal sebagai *Gonadosomatic Index* (GSI). IKG adalah ukuran sederhana yang mengekspresikan berat gonad sebagai persentase dari total berat tubuh ikan. Tujuannya adalah untuk menstandarisasi berat gonad terhadap ukuran ikan, sehingga perbandingan dapat dibuat antara ikan-ikan dengan ukuran yang berbeda.

Rumus untuk menghitung IKG adalah:

$$\text{IKG} = \frac{\text{Berat Total Tubuh (g)} \times \text{Berat Gonad (g)}}{\text{Berat Gonad (g)}} \times 100$$

Beberapa peneliti lebih memilih menggunakan berat tubuh tanpa gonad (*somatic body weight*) di bagian penyebut untuk menghindari korelasi palsu, karena berat gonad itu sendiri merupakan bagian dari berat total tubuh. Rumusnya menjadi:

$$\text{IKG} = \frac{\text{Berat Total Tubuh (g)} - \text{Berat Gonad (g)}}{\text{Berat Gonad (g)}} \times 100$$

Ketika nilai IKG rata-rata dari sampel populasi diplotkan berdasarkan bulan penangkapan, pola musiman yang jelas sering kali muncul. Nilai IKG akan rendah selama periode non-reproduktif, kemudian meningkat secara progresif seiring dengan pematangan gonad, mencapai puncaknya tepat sebelum atau selama musim pemijahan, dan kemudian turun drastis setelah pemijahan selesai. Pola ini menjadikan IKG sebagai alat yang sangat

berguna dan objektif untuk mengidentifikasi puncak musim pemijahan suatu populasi (De Vlaming, Grossman, & Chapman, 1982).

Misalnya, jika plot IKG bulanan untuk ikan kembung di Laut Jawa menunjukkan puncak yang tajam pada bulan September hingga November, ini memberikan bukti kuat bahwa periode tersebut adalah musim pemijahan utamanya. Informasi ini dapat langsung digunakan untuk merekomendasikan penutupan musim penangkapan selama periode tersebut untuk melindungi stok yang sedang bereproduksi.

Indeks kuantitatif lain yang sering digunakan bersamaan dengan IKG adalah Indeks Hepatosomatik (IHS) atau *Hepatosomatic Index* (HSI). Indeks ini mengukur berat hati sebagai persentase dari berat tubuh.

Rumus untuk menghitung IHS adalah:

$$\text{IHS} = \frac{\text{Berat Total Tubuh (g)Berat Hati (g)} \times 100}{\text{Berat Total Tubuh (g)}}$$

Seperti yang telah dibahas, hati (liver) adalah organ utama yang bertanggung jawab untuk memproduksi vitelogenin, prekursor kuning telur, pada ikan betina. Selama proses vitelogenesis, hati bekerja sangat keras, sehingga ukurannya sering kali membesar secara signifikan. Oleh karena itu, pada banyak spesies ikan betina, pola IHS bulanan sering kali menunjukkan hubungan yang erat dengan pola IKG. Nilai IHS akan meningkat selama tahap perkembangan ovarium (Tahap II dan III) ketika produksi vitelogenin sedang gencar-gencarnya, dan kemudian mungkin akan menurun saat energi dialihkan sepenuhnya ke gonad tepat sebelum pemijahan.

Menganalisis IKG dan IHS secara bersamaan dapat memberikan gambaran yang lebih lengkap tentang fisiologi reproduksi dan alokasi energi. Pada ikan jantan, pola IHS biasanya tidak menunjukkan fluktuasi musiman yang sama kuatnya dengan betina, karena testis tidak mengakumulasi cadangan energi dalam jumlah besar seperti ovarium. Perbedaan pola ini juga dapat membantu dalam memahami dinamika reproduksi yang spesifik gender.

Meskipun sangat berguna, penting untuk menggunakan indeks-indeks ini dengan hati-hati. Nilai IKG, misalnya, bisa menyesatkan pada ikan batch spawner, di mana hanya sebagian kecil telur yang matang dan dilepaskan

pada satu waktu, sehingga berat gonad total tidak turun drastis setelah satu episode pemijahan. Selain itu, kondisi nutrisi ikan (faktor kondisi) juga dapat mempengaruhi ukuran hati, sehingga perubahan IHS tidak selalu semata-mata disebabkan oleh aktivitas reproduksi. Oleh karena itu, interpretasi terbaik selalu didapatkan ketika data indeks kuantitatif (IKG, IHS) digabungkan dengan data kualitatif dari analisis TKG morfologis dan/ atau histologis.

C. Fekunditas, Diameter Telur, dan Tipe Pemijahan (*Spawning*)

Setelah memahami bagaimana gonad berkembang dan kapan ikan memijah, pertanyaan penting berikutnya adalah: "Berapa banyak keturunan yang dapat dihasilkan?". Jawaban atas pertanyaan ini terletak pada studi tentang fekunditas. Fekunditas adalah parameter reproduksi kunci yang mengukur kapasitas reproduktif seekor ikan betina, yang didefinisikan sebagai jumlah oosit (sel telur) matang dalam ovarium sesaat sebelum pemijahan.

Fekunditas adalah komponen kritis dalam dinamika populasi. Bersama dengan tingkat kelangsungan hidup dari telur hingga menjadi dewasa, fekunditas menentukan potensi rekrutmen suatu stok. Spesies dengan fekunditas tinggi (misalnya, ikan kod yang dapat menghasilkan jutaan telur) sering kali menunjukkan strategi reproduksi yang mengandalkan jumlah besar untuk mengatasi mortalitas awal yang sangat tinggi. Sebaliknya, spesies dengan fekunditas rendah (misalnya, beberapa jenis hiu yang hanya melahirkan beberapa anak) biasanya menginvestasikan lebih banyak energi pada setiap keturunan untuk memastikan tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi.

Dalam biologi perikanan, estimasi fekunditas sangat penting untuk beberapa alasan. Pertama, ia digunakan untuk menghitung potensi reproduktif total dari suatu populasi (total produksi telur), yang merupakan masukan penting untuk model-model hubungan stok-rekrutmen. Kedua, perubahan fekunditas dari tahun ke tahun dapat menjadi indikator kesehatan stok atau dampak dari perubahan kondisi lingkungan. Misalnya, ikan yang kekurangan makanan mungkin akan memiliki fekunditas yang lebih rendah. Ketiga, hubungan antara fekunditas dan ukuran tubuh ikan

dapat digunakan untuk menilai kontribusi reproduktif dari berbagai kelas ukuran dalam populasi, yang penting untuk mengevaluasi dampak dari regulasi ukuran tangkap.

Perlu dibedakan antara beberapa jenis fekunditas:

1. Fekunditas Absolut (atau Total): Jumlah total oosit matang yang akan dikeluarkan oleh seekor ikan dalam satu musim pemijahan.
2. Fekunditas Relatif: Fekunditas absolut per unit berat atau panjang tubuh ikan. Ini digunakan untuk membandingkan potensi reproduktif antara ikan-ikan dengan ukuran yang berbeda.
3. Fekunditas Batch (Batch Fecundity): Untuk ikan yang memijah berkali-kali dalam satu musim (batch spawner), ini adalah jumlah telur yang dilepaskan dalam satu kali episode pemijahan. Fekunditas total untuk ikan semacam ini adalah jumlah dari semua fekunditas batch selama musim tersebut.

Penentuan fekunditas adalah proses yang cermat dan sering kali melelahkan, yang harus dilakukan pada ovarium yang berada pada tahap matang (TKG III atau IV) tetapi belum mulai memijah.

1. Metode Estimasi Fekunditas (Total dan Relatif)

Estimasi fekunditas yang akurat bergantung pada kemampuan untuk menghitung atau memperkirakan jumlah oosit matang dalam sepasang ovarium. Karena jumlahnya bisa mencapai jutaan, penghitungan total secara langsung biasanya tidak praktis. Oleh karena itu, sebagian besar metode estimasi fekunditas didasarkan pada pendekatan sub-sampling. Prosedur umumnya adalah sebagai berikut:

- a. Seleksi Sampel: Pilih ikan betina dengan ovarium pada TKG III akhir atau TKG IV awal. Pada tahap ini, kelompok oosit yang akan memijah pada musim tersebut (oosit vitelogenik akhir) biasanya sudah dapat dibedakan dengan jelas dari kelompok oosit cadangan yang lebih kecil (oosit previtelogenik). Ovarium dari ikan yang sudah mulai memijah (TKG IV akhir) atau sudah salin (TKG V) tidak boleh digunakan karena sebagian telur mungkin sudah dilepaskan, yang akan menghasilkan estimasi yang terlalu rendah.

- b. Pengawetan dan Penimbangan Gonad: Sepasang ovarium diambil dengan hati-hati dari rongga tubuh, dibersihkan dari jaringan mesenterium yang menempel, dikeringkan permukaannya, dan ditimbang dengan timbangan analitik untuk mendapatkan berat gonad total yang akurat (Wg). Ovarium tersebut kemudian biasanya diawetkan dalam larutan pengawet seperti Larutan Gilson atau formalin 5-10%. Larutan Gilson sangat efektif karena tidak hanya mengawetkan telur tetapi juga membantu mengeraskan oosit dan melepaskannya dari jaringan ikat ovarium, membuatnya lebih mudah untuk dipisahkan dan dihitung.
- c. Pengambilan Sub-sampel: Setelah diawetkan dan dibersihkan, sub-sampel telur diambil dari ovarium. Ada beberapa metode untuk melakukan ini:
- 1) Metode Gravimetri (Metode Berat): Ini adalah metode yang paling umum dan dianggap paling akurat. Sejumlah kecil sub-sampel telur (biasanya 0.1 - 0.5 gram) diambil dari beberapa bagian ovarium (anterior, tengah, dan posterior) untuk memastikan representativitas. Sub-sampel ini kemudian ditimbang dengan sangat akurat (Ws). Jumlah telur dalam sub-sampel ini dihitung secara manual (Ns). Fekunditas total (F) kemudian dihitung dengan ekstrapolasi sederhana:

$$F = Ns \times Ws / Wg$$
 - 2) Metode Volumetri: Ovarium atau semua telur yang telah dipisahkan ditempatkan dalam gelas ukur dan volume totalnya dicatat (Vg). Kemudian, volume sub-sampel kecil diambil (Vs) dan jumlah telur di dalamnya dihitung (Ns). Fekunditas dihitung sebagai:

$$F = Ns \times Vs / Vg$$

Metode ini cenderung kurang akurat dibandingkan gravimetri karena kesulitan dalam mengukur volume secara presisi.
 - 3) Metode Otomatis (Penghitung Partikel atau Analisis Gambar): Untuk mempercepat proses, teknologi modern dapat digunakan. Telur yang telah dipisahkan dapat disuspensikan dalam cairan dan dilewatkan melalui penghitung partikel elektronik. Atau, foto sub-

sampel telur dapat diambil dan perangkat lunak analisis gambar (*image analysis software*) dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan menghitung telur secara otomatis. Metode ini sangat cepat tetapi memerlukan peralatan yang mahal dan kalibrasi yang cermat (Thorsen & Kjesbu, 2001).

Setelah fekunditas absolut (F) dihitung, fekunditas relatif dapat dengan mudah ditentukan dengan membaginya dengan berat total tubuh atau panjang total ikan. Contoh: Fekunditas relatif per gram = $F / \text{Berat Total Tubuh (g)}$.

Analisis Diameter Telur

Bersamaan dengan estimasi fekunditas, analisis distribusi frekuensi diameter telur sering kali dilakukan. Ini melibatkan pengukuran diameter sejumlah besar oosit yang diambil secara acak dari ovarium menggunakan mikrometer okuler pada mikroskop atau melalui analisis gambar. Data ini memberikan informasi yang sangat berharga tentang strategi dan tipe pemijahan suatu spesies.

Ketika frekuensi (jumlah) oosit diplotkan terhadap kelas-kelas ukuran diameternya, pola distribusi yang berbeda dapat muncul:

- a. **Distribusi Unimodal dan Sinkron:** Plot menunjukkan satu kelompok oosit yang jelas dan terpisah (satu puncak atau modus) yang sedang berkembang menuju ukuran matang, sementara kelompok oosit cadangan yang sangat kecil tetap ada. Ini adalah ciri khas dari total *spawner* (atau *synchronous spawner*). Ikan ini mematangkan semua telurnya secara bersamaan dan melepaskannya dalam satu episode pemijahan singkat selama musim tersebut. Banyak ikan di daerah beriklim sedang, seperti ikan salmon, menunjukkan pola ini.
- b. **Distribusi Multimodal dan Asinkron:** Plot menunjukkan beberapa kelompok (modus) oosit pada berbagai tahap perkembangan secara bersamaan di dalam ovarium. Terdapat oosit kecil, oosit yang sedang mengalami vitelogenesis, dan oosit yang hampir matang. Ini adalah ciri khas dari *batch spawner* (atau *partial/serial spawner*). Ikan ini mematangkan dan melepaskan telurnya dalam beberapa "batch" atau porsi secara berurutan sepanjang musim pemijahan yang panjang.

Strategi ini umum ditemukan pada ikan-ikan di daerah tropis, seperti banyak spesies ikan teri dan beberapa ikan karang. Dengan memijah berkali-kali, mereka menyebarkan risiko kegagalan reproduksi dari waktu ke waktu. Jika kondisi lingkungan tidak menguntungkan pada satu waktu, batch telur berikutnya mungkin memiliki kesempatan yang lebih baik untuk bertahan hidup (Hunter, Lo, & Leong, 1985).

Analisis diameter telur, oleh karena itu, bukan hanya memberikan informasi tentang ukuran telur, tetapi juga menjadi alat diagnostik yang kuat untuk menyimpulkan tipe pemijahan. Mengetahui apakah suatu spesies adalah *total spawner* atau *batch spawner* sangat penting karena akan menentukan bagaimana fekunditas tahunan harus diestimasi dan bagaimana musim pemijahan harus didefinisikan. Untuk *batch spawner*, estimasi fekunditas total tahunan jauh lebih rumit, karena memerlukan estimasi fekunditas per batch dan jumlah batch pemijahan per musim.

2. Hubungan Fekunditas dengan Ukuran Ikan

Fekunditas bukanlah nilai yang konstan untuk semua individu dalam suatu populasi. Secara umum, fekunditas meningkat seiring dengan bertambahnya ukuran (panjang atau berat) dan umur ikan. Ikan yang lebih besar dan lebih tua cenderung menghasilkan telur yang jauh lebih banyak daripada ikan yang lebih kecil dan lebih muda yang baru pertama kali matang gonad. Hubungan ini adalah salah satu prinsip paling fundamental dalam biologi perikanan dan memiliki implikasi manajemen yang mendalam.

Hubungan antara fekunditas (F) dan ukuran tubuh, seperti panjang (L) atau berat (W), biasanya digambarkan dengan menggunakan model regresi. Hubungan yang paling umum digunakan adalah:

- a. Hubungan Fekunditas-Panjang: Biasanya berbentuk pangkat (*power function*):

$$F = aL^b$$

Di mana a adalah intersep dan b adalah eksponen yang menggambarkan laju peningkatan fekunditas dengan panjang. Nilai b biasanya mendekati 3, tetapi dapat bervariasi. Untuk mempermudah

analisis regresi, persamaan ini sering kali dilinearisasi dengan transformasi logaritmik:

$$\log(F)=\log(a)+b\cdot\log(L)$$

- b. Hubungan Fekunditas-Berat: Biasanya berbentuk linier:

$$F=c+dW$$

Di mana c adalah intersep dan d adalah kemiringan (*slope*) yang menunjukkan penambahan jumlah telur untuk setiap penambahan satu unit berat.

Dengan mengumpulkan data fekunditas, panjang, dan berat dari sejumlah besar ikan betina, parameter-parameter model regresi ini (a , b , c , d) dapat diestimasi. Model yang dihasilkan kemudian dapat digunakan untuk memprediksi fekunditas seekor ikan hanya dari ukuran tubuhnya, tanpa perlu melakukan proses perhitungan telur yang melelahkan setiap saat.

Implikasi dari hubungan positif ini sangat signifikan. Ia menyoroti pentingnya keberadaan individu-individu ikan yang besar dan tua dalam suatu populasi. Ikan-ikan ini, yang sering disebut sebagai BOFFFFs (*Big Old Fat Fecund Female Fish*), tidak hanya menghasilkan jumlah telur yang jauh lebih banyak, tetapi penelitian juga menunjukkan bahwa telur dari ikan yang lebih tua sering kali memiliki kualitas yang lebih baik (ukuran lebih besar, kandungan lipid lebih tinggi), yang menghasilkan larva dengan tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi (Hixon, Johnson, & Sogard, 2014).

Kebijakan pengelolaan yang hanya berfokus pada perlindungan ikan-ikan kecil (melalui ukuran tangkap minimum) sambil membiarkan penangkapan ikan-ikan besar tanpa batas dapat secara tidak sengaja menghilangkan komponen populasi yang paling produktif secara reproduktif. Hal ini dapat secara drastis mengurangi potensi reproduktif total stok dan membuatnya lebih rentan terhadap kegagalan rekrutmen. Oleh karena itu, pemahaman tentang hubungan fekunditas-ukuran ini mendukung penerapan langkah-langkah pengelolaan tambahan, seperti kuota slot (*slot limits*) yang melindungi ikan di bawah ukuran minimum dan di atas ukuran maksimum, atau penetapan kawasan

konservasi di mana ikan dapat tumbuh hingga mencapai ukuran besar dan usia tua. Ini adalah contoh nyata bagaimana informasi biologis fundamental dapat dan harus diterjemahkan menjadi strategi pengelolaan yang lebih cerdas dan efektif.

DUMMY

Setelah memahami bagaimana suatu populasi ikan meregenerasi dirinya melalui reproduksi, fokus analisis dalam biologi perikanan beralih ke dua parameter individu yang saling terkait dan sangat fundamental: umur dan pertumbuhan. Pertumbuhan, yang didefinisikan sebagai perubahan ukuran (panjang atau berat) seiring waktu, adalah proses sentral yang menentukan seberapa cepat seekor ikan mencapai ukuran layak tangkap, seberapa besar ia bisa tumbuh, dan berapa banyak biomassa yang dihasilkannya. Sementara itu, umur menyediakan sumbu waktu yang esensial untuk mengukur laju pertumbuhan tersebut. Tanpa mengetahui umur seekor ikan, kita tidak dapat mengatakan apakah ikan tersebut tumbuh dengan cepat atau lambat.

Studi tentang umur dan pertumbuhan merupakan salah satu pilar paling klasik dan paling penting dalam ilmu perikanan kuantitatif. Informasi yang dihasilkan dari analisis ini menjadi masukan kritis bagi hampir semua model penilaian stok yang digunakan saat ini. Mengetahui struktur umur suatu populasi—yaitu proporsi ikan pada setiap kelas umur—memungkinkan kita untuk memahami sejarah rekrutmen (apakah ada “angkatan” yang kuat atau lemah di masa lalu) dan untuk memprediksi kelimpahan di masa depan. Mengetahui laju pertumbuhan memungkinkan kita untuk menghitung laju penambahan biomassa dalam populasi, yang kemudian harus diseimbangkan dengan laju kehilangan biomassa akibat mortalitas alami dan penangkapan.

Secara praktis, data umur dan pertumbuhan digunakan untuk:

1. Menghitung Laju Mortalitas: Dengan melacak penurunan jumlah individu dari satu kelas umur ke kelas umur berikutnya dalam data hasil tangkapan, kita dapat memperkirakan laju mortalitas total (Z).

2. Menentukan Umur dan Ukuran saat Matang Gonad: Menggabungkan data umur dengan data kematangan gonad memungkinkan penentuan umur saat pertama kali matang gonad (t_m), sebuah parameter kunci untuk melindungi stok induk.
3. Membangun Model Pertumbuhan: Data pasangan umur-panjang atau umur-berat adalah bahan baku untuk membangun model pertumbuhan matematis, seperti model von Bertalanffy. Model ini memprediksi ukuran rata-rata ikan pada setiap umur dan mengestimasi parameter-parameter penting seperti panjang asimtotik (L_{∞}) dan koefisien pertumbuhan (K).
4. Mengevaluasi Kesehatan Stok: Perubahan laju pertumbuhan dari waktu ke waktu dapat menjadi indikator adanya stres lingkungan atau tekanan kepadatan (kompetisi).

Mengingat peran sentralnya, bab ini akan mengupas tuntas metodologi untuk menentukan umur dan menganalisis pertumbuhan ikan. Kita akan memulai dengan menjelajahi berbagai teknik yang digunakan untuk “membaca” umur ikan dari struktur keras tubuhnya, sebuah proses yang mirip dengan dendrokronologi pada pohon. Selanjutnya, kita akan mendalami analisis matematis dari data pertumbuhan, termasuk hubungan panjang-berat dan pemodelan kurva pertumbuhan yang menjadi landasan bagi banyak penilaian stok modern.

A. Metode Penentuan Umur Ikan

Menentukan umur seekor ikan liar bukanlah tugas yang mudah. Berbeda dengan hewan ternak, ikan tidak membawa “akta kelahiran”. Oleh karena itu, para ahli biologi perikanan harus bertindak sebagai detektif, mencari petunjuk-petunjuk biologis yang dapat mengungkapkan umur individu. Metode-metode yang dikembangkan untuk tujuan ini secara umum dapat dibagi menjadi dua kategori besar: metode tidak langsung dan metode langsung (Campana, 2001).

Metode Tidak Langsung, yang paling klasik adalah analisis distribusi frekuensi panjang (juga dikenal sebagai Metode Petersen). Metode ini tidak menentukan umur individu ikan secara spesifik, melainkan mencoba

untuk mengidentifikasi kelompok-kelompok umur (*kohort*) yang berbeda dalam sampel populasi berdasarkan distribusi panjangnya. Idanya adalah bahwa ikan yang lahir pada musim pemijahan yang sama akan tumbuh dengan laju yang kurang lebih sama, sehingga pada waktu tertentu, mereka akan membentuk kelompok dengan modus panjang yang jelas. Dengan melacak pergeseran modus-modus ini dari waktu ke waktu (misalnya, dari bulan ke bulan), laju pertumbuhan dapat diperkirakan. Meskipun berguna untuk ikan-ikan muda yang tumbuh cepat dan memiliki musim pemijahan yang singkat dan jelas, metode ini menjadi sangat tidak dapat diandalkan untuk ikan yang lebih tua. Seiring bertambahnya umur, laju pertumbuhan melambat, dan tumpang tindih dalam distribusi panjang antar kelas umur yang berdekatan menjadi begitu besar sehingga modus-modus individu tidak lagi dapat dibedakan.

Metode Langsung, di sisi lain, berupaya menentukan umur setiap individu ikan. Pendekatan ini dapat berupa:

1. Penandaan dan Penangkapan Kembali (*Tag and Recapture*): Ini adalah metode yang paling definitif. Ikan ditangkap, diukur, ditandai dengan tanda pengenalan unik, dan dilepaskan kembali. Ketika ikan tersebut tertangkap kembali di kemudian hari, umurnya dapat diketahui secara pasti (jika umurnya pada saat penandaan pertama diketahui) atau setidaknya interval waktu pertumbuhannya diketahui. Meskipun sangat akurat, metode ini sangat mahal, memakan waktu, dan sering kali memiliki tingkat pengembalian (jumlah ikan yang tertangkap kembali) yang sangat rendah.
2. Analisis Struktur Keras (*Hard Part Analysis*): Ini adalah metode langsung yang paling umum dan praktis digunakan dalam biologi perikanan. Metode ini didasarkan pada sebuah prinsip fundamental: banyak struktur keras dalam tubuh ikan (seperti sisik, tulang, dan otolit) tumbuh seiring dengan pertumbuhan ikan dan merekam pola pertumbuhan tersebut dalam bentuk tanda-tanda periodik, mirip dengan lingkaran tahunan pada batang pohon.

Prinsip di balik analisis struktur keras adalah adanya pertumbuhan musiman. Ikan, sebagai hewan poikilotermik, laju metabolismenya sangat dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Di daerah beriklim sedang,

pertumbuhan cepat terjadi selama musim semi dan musim panas yang hangat dan kaya makanan, sementara pertumbuhan melambat atau bahkan berhenti selama musim dingin yang dingin dan miskin makanan. Di daerah tropis, di mana variasi suhu mungkin tidak begitu ekstrem, pertumbuhan sering kali dipengaruhi oleh siklus musiman lain, seperti musim hujan dan musim kemarau (yang mempengaruhi ketersediaan makanan dan salinitas) atau siklus reproduksi (di mana energi dialihkan dari pertumbuhan somatik ke perkembangan gonad).

Pergantian antara periode pertumbuhan cepat dan lambat ini meninggalkan jejak yang dapat dikenali pada struktur keras. Zona pertumbuhan cepat biasanya tampak lebih lebar dan opak (tidak tembus cahaya), sedangkan zona pertumbuhan lambat tampak lebih sempit dan lebih padat, sering kali terlihat sebagai garis gelap atau transparan (hyaline) di bawah mikroskop. Satu pasang zona pertumbuhan cepat dan lambat ini secara kolektif disebut sebagai annulus (jamak: annuli) dan diasumsikan mewakili pertumbuhan selama satu tahun. Dengan menghitung jumlah annuli ini, umur ikan dalam tahun dapat diperkirakan.

1. Penggunaan Struktur Keras: Sisik, Tulang Operkulum, dan Otolit

Pemilihan struktur keras yang tepat untuk penentuan umur adalah langkah kritis pertama dan sangat bergantung pada spesies yang dipelajari, rentang umur populasi, serta sumber daya (waktu dan biaya) yang tersedia. Tidak ada satu struktur pun yang sempurna untuk semua situasi. Tiga jenis struktur keras yang paling umum digunakan dalam biologi perikanan adalah sisik, tulang operkulum, dan otolit. Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri.

Struktur yang ideal untuk penentuan umur harus memenuhi beberapa kriteria penting (Beamish & McFarlane, 1983):

- a. Struktur tersebut harus tumbuh secara proporsional dengan pertumbuhan tubuh ikan sepanjang hidupnya.
- b. Struktur tersebut harus merekam tanda pertumbuhan periodik (annuli) dengan jelas dan konsisten.
- c. Tanda yang terbentuk harus sesuai dengan interval waktu yang tetap (misalnya, satu tanda per tahun).

- d. Struktur tersebut harus mudah diambil, disimpan, dan diproses.
- e. Struktur tersebut tidak boleh mengalami resorpsi (penyerapan kembali) atau remodeling, yang dapat menghilangkan tanda-tanda pertumbuhan yang telah terbentuk sebelumnya.

Struktur-struktur ini pada dasarnya berfungsi sebagai "pencatat data" alami atau "tag" biologis yang dibawa oleh setiap ikan. Dengan mempelajari cara "membaca" catatan ini, kita dapat membuka arsip sejarah kehidupan individu ikan.

Prinsip Dasar Pembentukan Annulus

Seperti yang telah disinggung, dasar dari penentuan umur adalah pembentukan annulus. Mari kita perdalam konsep ini. Bayangkan sebuah struktur keras yang tumbuh dengan cara menambahkan lapisan-lapisan baru di tepinya (pertumbuhan aposisional). Selama periode pertumbuhan cepat (misalnya, musim panas), materi yang ditambahkan (misalnya, kalsium karbonat dan protein) terdeposit dengan cepat dan kurang padat. Lapisan ini akan tampak lebar dan opak (buram atau putih jika dilihat dengan cahaya pantul). Sebaliknya, selama periode pertumbuhan lambat (misalnya, musim dingin), materi terdeposit dengan sangat lambat dan lebih padat. Lapisan ini akan tampak sempit dan transparan atau hyaline (bening atau gelap jika dilihat dengan cahaya pantul).

Satu annulus didefinisikan sebagai kombinasi dari satu zona opak dan satu zona transparan yang berdekatan. Dengan mengidentifikasi batas antara zona transparan (akhir dari pertumbuhan lambat) dan zona opak berikutnya (awal dari pertumbuhan cepat), kita dapat menghitung jumlah "tahun" yang telah dilalui ikan. Titik awal dari semua pertumbuhan ini adalah fokus atau inti (*core*), yang merepresentasikan ukuran struktur pada saat pertama kali terbentuk. Dengan menghitung jumlah annuli dari fokus ke tepi struktur, umur ikan dapat diestimasi.

Tantangan utama dalam penentuan umur adalah memastikan bahwa tanda yang diamati benar-benar merupakan annuli (tanda tahunan) dan bukan "tanda palsu" (*false checks* atau *false rings*). Tanda palsu dapat terbentuk akibat gangguan pertumbuhan non-musiman, seperti periode kelaparan singkat, penyakit, atau stres lainnya. Oleh karena itu, pengalaman,

kehati-hatian, dan proses validasi sangat diperlukan untuk memastikan akurasi pembacaan umur.

a. Sisik (*Scales*)

Sisik adalah salah satu struktur pertama yang digunakan secara luas untuk penentuan umur ikan, terutama karena kemudahan dalam pengumpulannya. Sisik adalah lempengan-lempengan kecil yang berasal dari lapisan dermis kulit dan berfungsi sebagai pelindung eksternal. Ada dua tipe utama sisik yang umum digunakan untuk penentuan umur: sisik sikloid (memiliki tepi yang halus) yang umum pada ikan seperti sardin dan mas, dan sisik stenoid (memiliki duri-duri kecil atau ctenii di tepi posteriornya) yang umum pada ikan seperti kakap dan kerapu.

Struktur dan Pembentukan Tanda pada Sisik Jika dilihat di bawah mikroskop, permukaan sisik menunjukkan serangkaian punggungan konsentris yang disebut sirkuli (*circuli*). Sirkuli ini diletakkan secara berurutan seiring dengan pertumbuhan sisik. Selama periode pertumbuhan tubuh ikan yang cepat, sirkuli yang terbentuk akan lebih lebar dan jarak antar sirkuli akan lebih jauh. Sebaliknya, selama periode pertumbuhan lambat, sirkuli yang terbentuk akan lebih sempit dan jarak antar sirkuli menjadi sangat rapat. Zona di mana sirkuli-sirkuli ini berhimpitan inilah yang membentuk annulus. Selain itu, pada beberapa kasus, sirkuli yang terbentuk selama musim pertumbuhan lambat mungkin tidak lengkap dan terpotong oleh sirkuli pertama yang terbentuk pada musim pertumbuhan cepat berikutnya, sebuah fenomena yang disebut "cutting over", yang menjadi ciri khas lain dari sebuah annulus.

Kelebihan Penggunaan Sisik:

- 1) Non-lethal: Keuntungan terbesar dari penggunaan sisik adalah bahwa sampel dapat diambil tanpa harus membunuh ikan. Ini sangat penting untuk studi pada populasi yang terancam punah atau untuk program penandaan di mana ikan harus tetap hidup.
- 2) Mudah Diambil dan Disimpan: Pengambilan sampel sisik hanya memerlukan pinset atau pisau, dan sisik dapat dengan mudah disimpan kering di dalam amplop kertas untuk analisis di kemudian hari.

- 3) Cepat Diproses: Persiapan sisik untuk pembacaan relatif sederhana, sering kali hanya memerlukan pembersihan dengan air dan penjepitan di antara dua kaca objek.

Kekurangan Penggunaan Sisik:

- 1) Regenerasi Sisik: Jika seekor ikan kehilangan sisiknya karena cedera atau sebab lain, sisik baru akan tumbuh kembali di tempat yang sama. Namun, sisik regenerasi ini memiliki area pusat yang kosong atau tidak terstruktur (fokus yang abnormal) dan tidak merekam sejarah pertumbuhan awal ikan tersebut. Sisik semacam ini tidak dapat digunakan untuk penentuan umur, dan peneliti harus berhati-hati untuk tidak memilihnya.
- 2) Resorpsi Tepi: Pada ikan yang lebih tua, atau selama periode stres berat seperti pemijahan, tubuh ikan dapat menyerap kembali kalsium dari tepi sisik. Proses resorpsi ini dapat mengikis dan menghilangkan annuli yang terbentuk paling akhir, yang menyebabkan umur ikan diestimasi lebih rendah dari yang sebenarnya (*underestimation*).
- 3) Ketidakjelasan pada Ikan Tua: Seiring melambatnya laju pertumbuhan pada ikan tua, annuli di bagian tepi sisik menjadi sangat berdekatan dan sulit untuk dibedakan.
- 4) Tidak Semua Ikan Memiliki Sisik: Banyak spesies, seperti ikan lele, tidak memiliki sisik sama sekali.

Meskipun memiliki keterbatasan, sisik tetap menjadi struktur yang berguna untuk penentuan umur, terutama untuk ikan-ikan muda dari spesies yang menunjukkan tanda pertumbuhan yang jelas pada sisiknya.

Prosedur Penggunaan Sisik untuk Penentuan Umur

Prosedur standar untuk penentuan umur menggunakan sisik melibatkan beberapa tahapan yang sistematis untuk memastikan konsistensi dan akurasi.

- 1) Pengambilan Sampel (*Sampling*): Lokasi pengambilan sisik dari tubuh ikan sangatlah penting. Sisik dari bagian tubuh yang berbeda memiliki bentuk dan ukuran yang bervariasi, dan tidak semuanya tumbuh dengan laju yang sama. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengambil

sampel sisik dari area tubuh yang terstandarisasi untuk semua ikan dalam suatu studi. Area yang direkomendasikan biasanya adalah area di bawah sirip punggung (dorsal) dan di atas gurat sisi (linea lateralis). Di area ini, sisik cenderung berukuran paling seragam, paling simetris, dan paling sedikit mengalami regenerasi. Biasanya, sekitar 5-10 sisik diambil dari setiap ikan sebagai cadangan jika beberapa di antaranya ternyata sisik regenerasi atau rusak.

- 2) Penyimpanan dan Pelabelan: Sisik yang telah diambil dibersihkan dari lendir dan jaringan kulit yang menempel, lalu dikeringkan. Sisik kering kemudian dimasukkan ke dalam amplop kertas kecil atau amplop khusus untuk sisik (*scale envelopes*). Informasi penting seperti nomor identifikasi ikan, spesies, tanggal penangkapan, lokasi, panjang, berat, dan jenis kelamin harus dicatat dengan jelas pada amplop. Pelabelan yang cermat adalah kunci untuk menghindari kesalahan dalam analisis data.
- 3) Persiapan untuk Pembacaan (Mounting): Sebelum dibaca, sisik perlu dibersihkan lebih lanjut. Sisik direndam dalam air untuk melunakkannya dan kemudian digosok dengan lembut menggunakan sikat kecil atau jari untuk menghilangkan sisa kotoran atau jaringan. Setelah bersih, beberapa sisik terbaik (yang tidak menunjukkan tanda-tanda regenerasi dan memiliki fokus yang jelas) dipilih untuk dipasang (*mounting*). Metode pemasangan yang umum adalah dengan menekan sisik di antara dua kaca objek mikroskop atau pada slide termoplastik. Penekanan ini akan membuat cetakan (*impression*) dari struktur permukaan sisik, yang sering kali lebih mudah dibaca daripada melihat sisik itu sendiri.
- 4) Pembacaan dan Interpretasi: Pembacaan sisik dilakukan di bawah mikroskop binokuler atau menggunakan *microfiche reader* atau *digital image analysis system* yang dapat memproyeksikan gambar sisik ke layar. Pembaca (disebut *age reader*) akan memulai dari fokus di tengah sisik dan bergerak keluar menuju tepi, mengidentifikasi dan menghitung jumlah annuli. Ciri-ciri annulus yang dicari adalah zona sirkuli yang berhimpitan (rapat) yang diikuti oleh zona sirkuli yang renggang, serta adanya fenomena "cutting over".

Untuk menjaga objektivitas, sangat disarankan agar pembacaan dilakukan tanpa mengetahui informasi lain tentang ikan tersebut (seperti panjang atau berat), untuk menghindari bias. Idealnya, setiap sisik harus dibaca oleh setidaknya dua pembaca yang berbeda secara independen. Jika ada ketidaksesuaian dalam hitungan umur, sisik tersebut harus dibaca kembali oleh kedua pembaca bersama-sama untuk mencapai konsensus. Jika konsensus tidak tercapai, sisik tersebut mungkin harus dibuang dari analisis. Tingkat kesepakatan antar pembaca sering kali dihitung sebagai metrik untuk menilai presisi dari proses penentuan umur.

b. Tulang Operkulum (*Opercular Bones*)

Selain sisik, beberapa bagian dari kerangka tulang ikan juga dapat digunakan untuk penentuan umur. Salah satu yang paling umum digunakan adalah tulang operkulum, yaitu tulang pipih dan besar yang membentuk tutup insang. Operkulum sebenarnya terdiri dari empat tulang: operkulum utama, preoperkulum, interoperkulum, dan suboperkulum. Tulang operkulum utama adalah yang paling sering digunakan karena merupakan yang terbesar dan paling datar.

Sama seperti sisik, tulang operkulum tumbuh dengan cara menambahkan lapisan-lapisan baru di tepinya. Pertumbuhan musiman juga meninggalkan jejak berupa zona pertumbuhan cepat dan lambat yang dapat diinterpretasikan sebagai annuli. Zona pertumbuhan lambat pada operkulum biasanya tampak sebagai garis yang lebih jelas dan lebih tebal dibandingkan dengan area pertumbuhan cepat yang lebih transparan.

Prosedur Penggunaan Operkulum:

- 1) Pengambilan dan Persiapan: Penggunaan operkulum adalah metode lethal, karena tulang ini harus diambil dari ikan yang sudah mati. Operkulum dipisahkan dari kepala, dan semua sisa daging dan jaringan ikat dibersihkan. Cara yang paling umum untuk membersihkannya adalah dengan merebus operkulum dalam air selama beberapa menit hingga daging menjadi lunak dan mudah dilepaskan. Setelah bersih, tulang dikeringkan.
- 2) Pembacaan: Karena ukurannya yang relatif besar, annuli pada operkulum sering kali dapat dilihat dengan mata telanjang atau

dengan bantuan kaca pembesar, terutama pada ikan muda. Tulang operkulum dilihat dengan menggunakan cahaya yang ditransmisikan dari bawah (cahaya tembus). Annuli akan tampak sebagai garis-garis gelap yang konsentris.

Kelebihan Penggunaan Operkulum:

- 1) Lebih Jelas pada Beberapa Spesies: Untuk beberapa spesies ikan, terutama yang hidup di air tawar seperti ikan *perch* atau *pike*, annuli pada operkulum sering kali lebih jelas dan lebih mudah dibaca daripada pada sisik.
- 2) Tidak Mengalami Regenerasi: Sebagai tulang, operkulum tidak mengalami masalah regenerasi seperti sisik.
- 3) Ukuran Besar: Ukurannya yang besar membuat penanganan dan pembacaannya lebih mudah dibandingkan struktur kecil seperti otolit.

Kekurangan Penggunaan Operkulum:

- 1) Metode Lethal: Ini adalah kelemahan utamanya. Ikan harus dikorbankan untuk mengambil sampel.
- 2) Resorpsi: Seperti sisik, operkulum juga dapat mengalami resorpsi pada bagian tepinya, terutama pada ikan tua, yang dapat menyebabkan estimasi umur yang lebih rendah.
- 3) Rapuh: Tulang ini bisa rapuh dan mudah patah saat proses pengambilan dan pembersihan jika tidak dilakukan dengan hati-hati.
- 4) Bentuk Tidak Beraturan: Bentuknya yang tidak beraturan dapat membuat pengukuran untuk studi pertumbuhan balik (*back-calculation*) menjadi lebih sulit dibandingkan dengan sisik atau otolit yang lebih simetris.

Penggunaan operkulum saat ini kurang umum dibandingkan dengan sisik atau otolit, tetapi tetap menjadi pilihan yang valid untuk spesies tertentu di mana struktur lain terbukti sulit untuk diinterpretasikan.

c. Otolit (*Otoliths*)

Dalam beberapa dekade terakhir, **otolit** telah menjadi struktur pilihan dan dianggap sebagai "standar emas" (*gold standard*) untuk penentuan umur pada sebagian besar spesies ikan bertulang sejati (Teleostei). Otolit, yang secara harfiah berarti "batu telinga" (*ear stones*), adalah struktur kristal

kalsium karbonat yang terdapat di dalam telinga dalam ikan. Mereka tidak terhubung secara langsung dengan kerangka tulang lainnya. Ikan memiliki tiga pasang otolit, masing-masing dengan fungsi yang sedikit berbeda dalam sistem pendengaran dan keseimbangan (*vestibular*):

- 1) *Sagitta* (jamak: *Sagittae*): Merupakan otolit terbesar dan paling sering digunakan untuk penentuan umur karena ukurannya dan kejelasan tanda pertumbuhannya.
- 2) *Lapillus* (jamak: *Lapilli*): Berukuran lebih kecil, sering kali digunakan untuk studi pertumbuhan harian pada larva dan yuana.
- 3) *Asteriscus* (Jamak: *Asterisci*): Sering kali merupakan yang terkecil dan bentuknya paling tidak beraturan, paling jarang digunakan untuk penentuan umur.

Struktur dan Komposisi Otolit terdiri dari kristal kalsium karbonat (biasanya dalam bentuk aragonit) yang terdeposit dalam sebuah matriks protein organik yang disebut otolin. Pertumbuhan otolit terjadi secara terus-menerus sepanjang hidup ikan melalui pengendapan lapisan-lapisan baru kalsium karbonat dan protein di permukaan luarnya. Proses pengendapan ini terjadi dengan ritme harian dan tahunan, menjadikan otolit sebagai perekam kronologis yang luar biasa akurat.

Keuntungan Utama Penggunaan Otolit:

- 1) *Akurasi Tinggi*: Otolit umumnya memberikan estimasi umur yang paling akurat dan presisi. Tanda pertumbuhan tahunan (*annuli*) dan bahkan harian (*daily increments*) sering kali terekam dengan sangat jelas.
- 2) *Tidak Mengalami Resorpsi*: Ini adalah keunggulan paling signifikan dibandingkan sisik dan tulang. Karena otolit berada di dalam telinga dalam dan tidak terhubung dengan sistem kerangka, mereka secara metabolik bersifat inert. Artinya, kalsium dari otolit tidak diserap kembali oleh tubuh bahkan selama periode kelaparan atau stres reproduksi. Oleh karena itu, catatan pertumbuhan yang sudah terbentuk tidak akan pernah hilang atau terhapus. Ini membuat otolit sangat andal untuk menentukan umur ikan tua (Campana & Neilson, 1985).

- 3) Hadir Sejak Lahir: Otolit sudah ada bahkan sebelum ikan menetas. Inti (core) dari otolit merepresentasikan kondisi pada saat embrio atau larva, dan tanda pertumbuhan harian pertama terbentuk pada saat menetas. Ini memungkinkan penentuan umur yang absolut (dalam hari) untuk ikan muda.
- 4) Analisis Mikrokimia: Komposisi kimia dari otolit dapat mencerminkan komposisi kimia air di mana ikan hidup pada saat lapisan otolit tersebut terbentuk. Ini membuka pintu untuk studi yang canggih, seperti melacak riwayat migrasi ikan dengan menganalisis elemen jejak (misalnya, Stronsium, Barium) di sepanjang sumbu pertumbuhan otolit.

Kekurangan Penggunaan Otolit:

- 1) Metode Lethal: Seperti operkulum, pengambilan otolit mengharuskan ikan untuk dibunuh.
- 2) Memerlukan Keahlian: Proses ekstraksi, persiapan, dan pembacaan otolit memerlukan lebih banyak waktu, peralatan, dan keahlian teknis dibandingkan dengan sisik. Ekstraksi otolit dari kepala ikan bisa menjadi tantangan bagi pemula.
- 3) Persiapan yang Lebih Rumit: Untuk ikan yang lebih tua, otolit sering kali menjadi terlalu tebal dan buram untuk dibaca secara utuh. Dalam kasus ini, otolit harus dipotong menjadi irisan tipis (thin sectioning) atau dibelah dan dibakar (*break-and-burn method*) untuk dapat melihat annuli di dekat inti.

Meskipun memiliki kekurangan ini, keandalan dan akurasi yang superior menjadikan otolit sebagai metode yang lebih diutamakan dalam sebagian besar program riset dan pemantauan perikanan modern di seluruh dunia.

Prinsip Pembentukan Annulus pada Otolit

Mekanisme pembentukan annulus pada otolit sedikit berbeda dari yang dijelaskan untuk sisik, dan pemahaman tentang hal ini penting untuk interpretasi yang benar. Pertumbuhan otolit dimediasi oleh pengendapan matriks protein (otolin) dan kristal kalsium karbonat. Rasio antara protein dan kalsium karbonat inilah yang menentukan kenampakan optik dari lapisan pertumbuhan.

- 1) Zona Pertumbuhan Cepat (misalnya, Musim Panas/Musim Hujan): Selama periode ketika metabolisme dan pertumbuhan somatik ikan berlangsung cepat, pengendapan kalsium karbonat pada otolit juga sangat dominan. Lapisan yang terbentuk kaya akan kristal aragonit dan relatif miskin protein. Lapisan ini memungkinkan cahaya untuk melewatinya dengan mudah. Ketika dilihat di bawah mikroskop dengan cahaya tembus (*transmitted light*), zona ini akan tampak terang atau transparan (*hyaline*). Namun, jika dilihat dengan cahaya pantul (*reflected light*), zona ini akan tampak gelap.
- 2) Zona Pertumbuhan Lambat (misalnya, Musim Dingin/Musim Kemarau): Selama periode pertumbuhan lambat, pengendapan kalsium karbonat melambat secara signifikan, tetapi pengendapan matriks protein terus berlanjut. Akibatnya, lapisan yang terbentuk relatif kaya akan protein (otolin) dan miskin kalsium karbonat. Konsentrasi protein yang tinggi ini menghalangi dan menyebarkan cahaya. Ketika dilihat dengan cahaya tembus, zona ini akan tampak gelap atau opak (*opaque*). Sebaliknya, jika dilihat dengan cahaya pantul, zona kaya protein ini akan tampak terang atau putih.

Kebingungan sering muncul karena terminologi "opak" dan "hyaline/transparan" dapat memiliki arti visual yang berlawanan tergantung pada metode iluminasi (cahaya tembus vs. cahaya pantul). Namun, konvensi internasional yang paling umum dalam literatur perikanan mendefinisikan satu annulus sebagai satu pasang zona opak dan transparan. Biasanya, "ulang tahun" ikan dihitung pada saat pembentukan zona opak (pertumbuhan lambat). Jadi, dengan menghitung jumlah zona opak (atau zona transparan, tergantung konvensi yang diikuti), umur ikan dalam tahun dapat diestimasi (Panfili et al., 2002).

Selain annuli, otolit juga merekam tanda pertumbuhan harian (*daily growth increments*). Ini adalah pita-pita yang sangat halus yang terdiri dari satu lapisan pengendapan selama siang hari (zona inkremental) dan satu lapisan pengendapan selama malam hari (zona diskontinu, kaya protein). Tanda harian ini hanya dapat dilihat dengan mikroskop berdaya tinggi. Dengan menghitung tanda-tanda ini dari inti ke tepi, umur ikan dalam hari dapat ditentukan dengan sangat akurat. Metode ini sangat berharga

untuk studi pada tahap larva dan yuwana, untuk memvalidasi annulus pertama, dan untuk memahami dinamika pertumbuhan pada skala waktu yang sangat halus.

Metode Persiapan dan Pembacaan Otolit

Karena otolit sering kali tebal dan memiliki tiga dimensi, persiapan yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa semua annuli, terutama yang berada di dekat inti pada ikan tua, dapat terlihat dengan jelas.

- 1) Ekstraksi: Otolit terletak di dalam kapsul tulang rawan di dasar tempurung kepala. Ada beberapa cara untuk mengekstraksinya. Cara yang paling umum adalah dengan membuat sayatan vertikal di bagian atas kepala, membuka tempurung kepala untuk mengekspos otak. Otak kemudian diangkat, dan otolit akan terlihat di dalam rongganya. Atau, sayatan dapat dibuat melalui lengkung insang untuk mengakses otolit dari bawah. Setelah diekstraksi, otolit dibersihkan dari sisa jaringan dan membran, dicuci, dan disimpan kering dalam vial kecil atau pelat mikrotiter yang diberi label.
- 2) Persiapan untuk Pembacaan: Metode persiapan bergantung pada umur dan spesies ikan, yang menentukan ukuran dan ketebalan otolit.
 - (a) Pembacaan Utuh (*Whole Otolith Reading*): Untuk ikan muda (biasanya umur 0-2 tahun), otolitya sering kali cukup tipis dan transparan sehingga annuli dapat dilihat tanpa perlu dipotong. Otolit utuh direndam dalam air, minyak cengkeh, atau gliserol untuk meningkatkan kejernihannya, dan ditempatkan dalam piringan petri hitam. Otolit dibaca di bawah mikroskop stereo dengan cahaya pantul.
 - (b) Metode Belah dan Bakar (*Break-and-Burn Method*): Ini adalah metode yang cepat dan efektif untuk otolit yang lebih tebal. Otolit dibelah tepat di tengah (melintasi inti) menggunakan jari atau pisau. Permukaan patahan yang dihasilkan kemudian dibakar dengan hati-hati di atas api kecil (seperti lampu alkohol) selama beberapa detik. Proses pembakaran akan membuat zona yang kaya protein (zona opak/pertumbuhan lambat) menjadi berwarna coklat atau kehitaman, sehingga kontrasnya dengan zona transparan

menjadi sangat tajam dan mudah dilihat. Permukaan yang telah dibakar kemudian diamati di bawah mikroskop.

(c) Metode Irisan Tipis (*Thin Sectioning*): Ini adalah metode yang paling memakan waktu tetapi memberikan hasil terbaik untuk otolit yang sangat tua, besar, dan sulit dibaca. Otolit terlebih dahulu ditanam dalam blok resin epoksi. Setelah resin mengeras, blok tersebut dipotong menggunakan gergaji presisi berkecepatan rendah (misalnya, gergaji Isomet) untuk menghasilkan irisan melintang yang sangat tipis (sekitar 0.3-0.5 mm) tepat melalui inti otolit. Irisan tipis ini kemudian dipasang pada kaca objek dan dapat diamati di bawah mikroskop majemuk dengan cahaya tembus. Metode ini memastikan bahwa bidang pandang benar-benar dua dimensi dan semua annuli dari inti hingga tepi dapat dilihat dengan jelas.

3) Pembacaan dan Interpretasi: Sama seperti pada sisik, pembacaan otolit memerlukan pengalaman dan objektivitas. Pembaca harus mengidentifikasi inti dan kemudian menghitung annuli secara sistematis ke arah tepi. Penggunaan sistem analisis gambar digital sangat membantu, karena memungkinkan pembaca untuk menandai setiap annulus di layar, melakukan pengukuran, dan menyimpan gambar untuk referensi di masa mendatang. Proses pembacaan ganda secara independen (*blind reads*) dan sesi resolusi perbedaan sangat dianjurkan untuk memastikan kualitas dan konsistensi data umur.

Memilih Struktur yang Tepat: Sebuah Ringkasan

Keputusan untuk menggunakan sisik, operkulum, atau otolit untuk studi umur dan pertumbuhan bukanlah keputusan yang sepele. Pilihan tersebut harus didasarkan pada pertimbangan yang cermat terhadap beberapa faktor.

Faktor Pertimbangan	Sisik	Tulang Operkulum	Otolit
Sifat Metode	Non-lethal (tidak mematikan)	Lethal (mematikan)	Lethal (mematikan)
Akurasi & Keandalan	Rendah hingga Sedang	Sedang	Tinggi

Faktor Pertimbangan	Sisik	Tulang Operkulum	Otolit
Masalah Resorpsi	Ya, signifikan pada ikan tua	Ya, bisa terjadi	Tidak Ada
Kejelasan Annuli	Bervariasi, sering sulit pada ikan tua	Baik pada beberapa spesies	Sangat Baik, bahkan pada ikan tua
Kemudahan Pengambilan	Sangat Mudah	Sedang	Sedang hingga Sulit
Waktu & Biaya Persiapan	Rendah	Rendah hingga Sedang	Sedang hingga Tinggi (jika diiris)
Informasi Tambahan	-	-	Pertumbuhan harian, Mikrokimia

Ekspor ke Spreadsheet

Kesimpulan Pemilihan Struktur:

- 1) Gunakan Sisik jika: (1) Studi bersifat non-lethal (misalnya, pada spesies terancam atau program penandaan); (2) Populasi didominasi oleh ikan-ikan muda; (3) Dana dan waktu sangat terbatas; dan (4) Telah divalidasi bahwa sisik memberikan hasil yang andal untuk spesies target.
- 2) Gunakan Operkulum jika: (1) Bekerja dengan spesies tertentu di mana operkulum terbukti lebih jelas daripada sisik (misalnya, beberapa ikan air tawar); dan (2) Otolit terlalu kecil atau sulit diekstraksi.
- 3) Gunakan Otolit jika: (1) Akurasi dan keandalan adalah prioritas utama; (2) Studi mencakup seluruh rentang umur populasi, termasuk ikan-ikan tua; (3) Diperlukan validasi umur atau analisis pertumbuhan harian; dan (4) Metode lethal dapat diterima dan sumber daya (peralatan, keahlian) tersedia.

Pada akhirnya, apa pun struktur yang dipilih, langkah paling penting yang sering diabaikan adalah validasi umur. Validasi adalah proses untuk membuktikan bahwa tanda yang dihitung benar-benar terbentuk dengan periodisitas tertentu (misalnya, satu kali per tahun). Tanpa validasi, penentuan umur hanyalah sebuah proses asumsi. Metode validasi akan dibahas pada sub-bab berikutnya, karena ia adalah jembatan yang menghubungkan

proses pembacaan struktur keras dengan keyakinan kita terhadap data umur yang dihasilkan.

2. Validasi Umur dan Analisis Distribusi Frekuensi Panjang

Proses menghitung cincin pertumbuhan pada sisik atau otolit, meskipun dilakukan dengan sangat hati-hati, pada dasarnya tetap merupakan proses interpretasi. Peneliti membuat asumsi fundamental bahwa tanda-tanda yang dihitung (annuli) benar-benar terbentuk dengan periodisitas tahunan. Namun, asumsi ini harus diuji dan dibuktikan secara ilmiah. Proses pembuktian inilah yang dikenal sebagai validasi umur (*age validation*). Validasi adalah langkah kritis yang membedakan antara penentuan umur yang hanya berupa seni interpretasi dan penentuan umur sebagai sebuah disiplin ilmu yang kuat dan dapat dipertahankan. Tanpa validasi, estimasi umur yang dihasilkan mungkin tidak akurat dan dapat menyebabkan kesalahan serius dalam penilaian stok dan rekomendasi pengelolaan (Beamish & McFarlane, 1983).

Validasi umur bertujuan untuk mengkonfirmasi dua hal utama:

- a. Temporalitas: Bahwa tanda-tanda pertumbuhan (annuli) benar-benar terbentuk dalam interval waktu yang konsisten (misalnya, satu kali per tahun).
- b. Akurasi: Bahwa hitungan jumlah annuli benar-benar sesuai dengan umur ikan yang sebenarnya dalam tahun.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk melakukan validasi umur, mulai dari metode yang relatif sederhana hingga yang melibatkan eksperimen di lapangan. Pilihan metode bergantung pada spesies, sumber daya yang tersedia, dan tingkat kepastian yang diinginkan. Idealnya, beberapa metode validasi digunakan secara bersamaan untuk memberikan bukti yang saling menguatkan.

Analisis Distribusi Frekuensi Panjang (Lanjutan)

Sebelum membahas metode validasi untuk struktur keras, penting untuk meninjau kembali analisis distribusi frekuensi panjang sebagai metode independen, meskipun terbatas. Seperti yang telah disebutkan, Metode Petersen bekerja dengan mengidentifikasi modus-modus panjang

dalam sampel populasi. Jika sampel dikumpulkan secara berurutan dari waktu ke waktu (misalnya, setiap bulan), pergerakan modus-modus ini dapat dilacak. Misalnya, jika modus panjang pada bulan April adalah 10 cm, dan pada bulan Oktober (enam bulan kemudian) modus yang sesuai bergeser menjadi 15 cm, ini menunjukkan pertumbuhan sebesar 5 cm dalam enam bulan.

Metode ini paling berguna untuk memvalidasi pembacaan umur pada ikan-ikan yang sangat muda (misalnya, umur 0+ dan 1+ tahun), di mana kelompok umur masih terpisah dengan jelas. Jika pembacaan otolit menunjukkan bahwa ikan dengan panjang rata-rata 10 cm berumur sekitar 6 bulan dan ikan dengan panjang 15 cm berumur sekitar 1 tahun, dan ini sesuai dengan pergerakan modus dalam data frekuensi panjang, maka ini memberikan validasi awal untuk pembacaan umur pada kelompok umur termuda. Namun, untuk ikan yang lebih tua, metode ini kehilangan kekuatannya karena tumpang tindih ukuran antar kelas umur. Oleh karena itu, untuk memvalidasi umur pada seluruh rentang hidup ikan, metode yang lebih langsung dan berbasis pada struktur keras sangat diperlukan.

Metode Validasi Umur Berbasis Struktur Keras

a. Analisis Tepi (*Marginal Increment Analysis*)

Ini adalah metode validasi yang paling umum digunakan, paling tidak langsung, dan paling populer karena tidak memerlukan eksperimen yang mahal. Metode ini bertujuan untuk membuktikan bahwa satu annulus (terdiri dari satu zona opak dan satu zona transparan) terbentuk selama periode satu tahun dengan cara mengamati pola pertumbuhan di tepi struktur keras sepanjang tahun.

Prosedur:

- 1) Sampel struktur keras (misalnya, otolit) dikumpulkan secara rutin dari populasi target setiap bulan selama setidaknya satu tahun penuh.
- 2) Untuk setiap otolit, umur diestimasi dengan menghitung jumlah annuli yang telah terbentuk sempurna.
- 3) Langkah kuncinya adalah mengamati dan mengklasifikasikan karakteristik tepi (margin) dari otolit tersebut. Tepi diklasifikasikan

sebagai “opak” (menunjukkan pertumbuhan lambat sedang terjadi) atau “transparan/hyaline” (menunjukkan pertumbuhan cepat sedang terjadi).

- 4) Untuk setiap bulan, persentase otolit yang memiliki tepi opak (atau transparan) dihitung.
- 5) Persentase bulanan ini kemudian diplotkan dalam grafik sepanjang tahun.

Interpretasi: Jika annuli benar-benar terbentuk setahun sekali, maka plot tersebut akan menunjukkan siklus musiman yang jelas. Misalnya, persentase otolit dengan tepi opak (pertumbuhan lambat) akan rendah selama musim pertumbuhan cepat (misalnya, musim panas atau musim hujan) dan akan meningkat secara progresif hingga mencapai puncaknya (mendekati 100%) selama musim pertumbuhan lambat (misalnya, musim dingin atau musim kemarau). Setelah mencapai puncak, persentase ini akan turun tajam seiring dengan dimulainya kembali periode pertumbuhan cepat.

Adanya satu puncak dan satu lembah yang jelas dalam siklus tahunan ini memberikan bukti kuat bahwa satu zona opak (dan dengan demikian, satu annulus) terbentuk setiap tahun. Metode ini tidak membuktikan bahwa hitungan total annuli akurat untuk ikan tua (misalnya, ikan berumur 10 tahun benar-benar memiliki 10 annuli), tetapi ia secara meyakinkan memvalidasi pembentukan annulus. Karena kesederhanaannya, analisis tepi harus dianggap sebagai persyaratan minimum untuk setiap studi penentuan umur yang serius (Campana, 2001).

Variasi dari metode ini adalah analisis lebar inkremen tepi (*marginal increment width analysis*). Alih-alih hanya mengklasifikasikan tepi secara kualitatif, metode ini mengukur jarak dari annulus terakhir yang terbentuk sempurna hingga ke tepi otolit. Lebar inkremen tepi ini akan menunjukkan pola siklus yang serupa: ia akan menjadi sangat kecil tepat setelah annulus baru terbentuk, kemudian akan meningkat secara progresif sepanjang musim pertumbuhan, dan mencapai maksimum tepat sebelum annulus berikutnya mulai terbentuk.

b. Penandaan Kimia (*Chemical Marking*)

Metode ini adalah pendekatan eksperimental yang lebih langsung dan kuat. Ia melibatkan pemberian tanda waktu yang diketahui secara pasti pada struktur keras ikan hidup. Ini dilakukan dengan menggunakan bahan kimia yang akan terdeposit bersama dengan kalsium karbonat pada struktur keras yang sedang tumbuh. Bahan kimia yang paling umum digunakan adalah antibiotik dari kelompok tetrasiklin, seperti oksitetrasiklin (*Oxytetracycline* - OTC).

Prosedur:

- 1) Sejumlah ikan hidup ditangkap dan disuntik dengan larutan OTC atau dibiarkan berenang dalam bak yang mengandung OTC.
- 2) Ketika diserap oleh tubuh, OTC akan terikat pada kalsium dan terdeposit di semua jaringan yang sedang mengalami kalsifikasi, termasuk sisik, tulang, dan otolit.
- 3) Yang terpenting, deposit OTC ini akan berpendar (*fluoresce*) dengan warna kuning-hijau terang ketika dilihat di bawah cahaya ultraviolet (UV) atau cahaya biru. Ini menciptakan "tanda waktu" buatan yang sangat jelas dan tidak salah lagi pada otolit atau struktur keras lainnya.
- 4) Ikan yang telah ditandai kemudian dipelihara di dalam tangki, kandang di alam, atau dilepaskan kembali ke alam liar (jika juga ditandai dengan tanda eksternal).
- 5) Setelah periode waktu tertentu (misalnya, tepat satu tahun), ikan-ikan tersebut ditangkap kembali.
- 6) Otolit mereka diambil, dipersiapkan (biasanya dengan membuat irisan tipis), dan diamati di bawah mikroskop fluoresens.

Interpretasi: Pengamatan di bawah mikroskop akan menunjukkan cincin OTC yang berpendar terang. Peneliti kemudian hanya perlu mengamati area di luar cincin OTC tersebut. Jika ikan dipelihara selama tepat satu tahun setelah penandaan, dan peneliti menemukan tepat satu annulus (satu pasang zona opak dan transparan) yang telah terbentuk di antara cincin OTC dan tepi otolit, maka ini memberikan bukti validasi yang sangat kuat bahwa satu annulus memang terbentuk setiap tahun.

Metode penandaan kimia ini dianggap sebagai salah satu metode validasi yang paling andal karena ia secara langsung menghubungkan pembentukan annulus dengan interval waktu yang diketahui secara pasti. Metode ini dapat digunakan baik pada ikan di penangkaran maupun di alam liar. Kelemahannya adalah ia lebih mahal, memerlukan izin untuk penggunaan antibiotik, dan (jika dilakukan di alam liar) bergantung pada keberhasilan penangkapan kembali ikan yang telah ditandai.

c. Metode Validasi Lainnya

- 1) Penandaan-Penangkapan Kembali (*Known-Age Fish*): Ini adalah standar emas absolut dari validasi umur, meskipun paling sulit dilakukan. Metode ini melibatkan penandaan ikan yang umurnya sudah diketahui secara pasti. Cara terbaik untuk mendapatkan ikan berumur pasti adalah dengan membesarkannya dari telur di laboratorium atau fasilitas pembenihan. Ikan-ikan ini kemudian ditandai dan dilepaskan ke alam. Jika salah satu dari mereka tertangkap kembali beberapa tahun kemudian, otolithnya dapat diperiksa. Jika ikan yang dilepaskan pada umur 1 tahun dan tertangkap kembali 5 tahun kemudian menunjukkan total 6 annuli pada otolithnya, maka ini memberikan validasi yang tidak terbantahkan. Namun, karena kesulitan dan biaya yang sangat tinggi, metode ini sangat jarang digunakan.
- 2) Analisis Radiometri (*Radiometric Dating*): Metode ini mirip dengan penanggalan karbon-14 yang digunakan dalam arkeologi. Ia memanfaatkan peluruhan alami dari isotop radioaktif yang secara alami terakumulasi dalam otolit. Pasangan isotop yang paling umum digunakan adalah Timbal-210 (^{210}Pb) dan Radium-226 (^{226}Ra). Radium-226 diserap dari air dan terdeposit di otolit, kemudian ia meluruh menjadi Timbal-210 dengan waktu paruh yang diketahui. Dengan mengukur rasio antara ^{210}Pb dan ^{226}Ra di inti otolit (yang mewakili akumulasi seumur hidup), umur ikan dapat dihitung. Metode ini sangat berguna untuk memvalidasi umur ikan yang hidup sangat lama (misalnya, lebih dari 50 tahun), di mana metode lain mungkin

gagal. Namun, ia memerlukan peralatan laboratorium yang sangat canggih dan mahal (Campana, 2005).

- 3) Validasi "Bomb Radiocarbon": Ini adalah metode unik yang memanfaatkan warisan dari uji coba bom nuklir di atmosfer pada tahun 1950-an dan 1960-an. Uji coba ini secara drastis meningkatkan konsentrasi Karbon-14 (^{14}C) di atmosfer, yang kemudian larut ke lautan. Peningkatan tajam kadar ^{14}C ini berfungsi sebagai "tanda waktu" global yang terekam dalam semua organisme hidup pada saat itu, termasuk pada inti otolit ikan yang lahir pada periode tersebut. Dengan mengukur kadar ^{14}C pada inti otolit ikan tua dan mencocokkannya dengan kurva referensi ^{14}C di lautan, tanggal lahir (dan dengan demikian, umur absolut) dari ikan tersebut dapat divalidasi dengan akurasi tinggi.

Kesimpulan tentang Validasi: Validasi bukanlah peristiwa satu kali, melainkan sebuah proses berkelanjutan. Idealnya, validasi harus dilakukan untuk setiap spesies dan stok yang berbeda, karena pola pertumbuhan dapat bervariasi secara geografis. Kombinasi dari beberapa metode—misalnya, menggunakan analisis tepi untuk semua sampel dan melengkapinya dengan eksperimen penandaan kimia pada sejumlah kecil ikan—akan memberikan keyakinan terbesar pada data umur yang dihasilkan. Data umur yang telah tervalidasi adalah fondasi yang kokoh untuk analisis pertumbuhan yang akan kita bahas selanjutnya.

B. Analisis Pertumbuhan Ikan

Pertumbuhan adalah salah satu proses biologis paling fundamental, yang merepresentasikan penambahan ukuran atau massa suatu organisme dari waktu ke waktu. Dalam konteks biologi perikanan, pertumbuhan adalah proses di mana energi yang diperoleh dari makanan diubah menjadi jaringan tubuh (pertumbuhan somatik) dan jaringan reproduksi (pertumbuhan gonad). Ini adalah proses kunci yang menghubungkan ekologi pakan ikan dengan produktivitas suatu populasi perikanan. Laju di mana ikan tumbuh secara langsung menentukan seberapa cepat suatu

kohort mencapai biomassa puncaknya dan berapa banyak hasil tangkapan yang dapat dihasilkan oleh suatu stok.

Pertumbuhan ikan bersifat tidak tentu (indeterminate), yang berarti mereka terus tumbuh sepanjang hidup mereka, meskipun lajunya melambat secara signifikan seiring dengan bertambahnya usia dan tercapainya kematangan seksual. Hal ini berbeda dengan hewan seperti mamalia atau burung yang memiliki pertumbuhan tertentu (determinate), di mana mereka berhenti tumbuh setelah mencapai ukuran dewasa. Sifat pertumbuhan tak tentu ini memiliki implikasi penting bagi dinamika populasi dan pengelolaan perikanan.

Analisis pertumbuhan dalam biologi perikanan bertujuan untuk mengkuantifikasi dan memodelkan pola perubahan ukuran (panjang atau berat) sebagai fungsi dari umur. Analisis ini memberikan wawasan tentang:

1. Laju Pertumbuhan: Seberapa cepat ikan mencapai ukuran tertentu.
2. Ukuran Maksimum: Ukuran rata-rata maksimum yang dapat dicapai oleh suatu spesies di lingkungan tertentu.
3. Variabilitas Pertumbuhan: Bagaimana laju pertumbuhan bervariasi antar individu, antar jenis kelamin, antar lokasi, atau dari tahun ke tahun.
4. Alokasi Energi: Bagaimana energi dialokasikan antara pertumbuhan tubuh dan reproduksi.

Data dasar untuk analisis pertumbuhan adalah pasangan data umur-dan-ukuran (panjang atau berat) yang diperoleh dari setiap individu ikan dalam sampel. Data umur diperoleh dari metode yang telah dibahas pada bagian sebelumnya (idealnya, dari otolit yang telah divalidasi), sementara data ukuran diperoleh melalui pengukuran langsung. Dua pendekatan pemodelan utama yang digunakan untuk menganalisis data ini adalah analisis hubungan panjang-berat dan pemodelan kurva pertumbuhan, yang akan dibahas secara mendalam pada sub-bab berikut.

1. Hubungan Panjang-Bobot dan Faktor Kondisi

Dalam survei perikanan, mengukur panjang ikan jauh lebih cepat dan lebih mudah daripada menimbang setiap individu, terutama di atas kapal

yang bergoyang. Namun, informasi biomassa (berat) sering kali lebih relevan untuk penilaian stok dan pengelolaan, karena hasil tangkapan biasanya dilaporkan dalam satuan berat (ton). Oleh karena itu, kemampuan untuk memprediksi berat seekor ikan dari panjangnya adalah alat yang sangat berguna dan fundamental dalam biologi perikanan. Hubungan matematis yang menggambarkan korelasi antara panjang dan berat ini dikenal sebagai Hubungan Panjang-Bobot (*Length-Weight Relationship* - LWR).

LWR tidak hanya berguna untuk konversi data, tetapi juga memberikan informasi biologis yang penting. Hubungan ini dapat digunakan untuk:

- a. Mengestimasi Biomassa: Mengubah data distribusi frekuensi panjang dari hasil tangkapan atau survei menjadi estimasi biomassa total.
- b. Menghitung Faktor Kondisi: Menilai "kegemukan" atau kesehatan relatif ikan, yang dapat mencerminkan ketersediaan makanan atau status reproduksi.
- c. Mempelajari Ontogeni: Menganalisis perubahan bentuk tubuh ikan seiring dengan pertumbuhannya.
- d. Membandingkan Populasi: Membandingkan pola pertumbuhan antar stok yang berbeda dari lokasi geografis yang berbeda.

LWR spesifik untuk setiap spesies dan bahkan dapat bervariasi antar populasi dalam spesies yang sama, antar jenis kelamin, dan antar musim. Oleh karena itu, sangat penting untuk menggunakan parameter LWR yang berasal dari populasi dan waktu yang relevan dengan data yang sedang dianalisis, atau jika tidak tersedia, menghitungnya secara langsung dari sampel yang representatif.

Model Matematis Hubungan Panjang-Bobot

Secara teoritis, jika seekor ikan tumbuh tanpa mengubah bentuk tubuh atau densitasnya, maka beratnya akan sebanding dengan volume, dan volume sebanding dengan pangkat tiga dari dimensinya (panjang). Hubungan ini secara matematis diekspresikan dalam bentuk persamaan pangkat (*power equation*) yang pertama kali dipopulerkan oleh Ricker (1975):

$$W=aL^b$$

dimana:

- a. W adalah berat total tubuh ikan (biasanya dalam gram).
- b. L adalah panjang total atau panjang baku ikan (biasanya dalam sentimeter).
- c. a adalah koefisien yang berhubungan dengan bentuk tubuh ikan. Ia sering diinterpretasikan sebagai "faktor kondisi" awal atau intersep dari kurva. Nilainya biasanya sangat kecil (misalnya, 0.01).
- d. b adalah eksponen atau parameter alometri, yang menggambarkan laju perubahan berat relatif terhadap panjang. Nilai b inilah yang memiliki interpretasi biologis yang penting.

Untuk mempermudah estimasi parameter a dan b menggunakan analisis regresi linier, persamaan pangkat ini biasanya ditransformasikan ke dalam bentuk logaritmik:

$$\log_{10}(W)=\log_{10}(a)+b\cdot\log_{10}(L)$$

atau dengan logaritma natural:

$$\ln(W)=\ln(a)+b\cdot\ln(L)$$

Dalam bentuk linier ini, $\log_{10}(a)$ atau $\ln(a)$ menjadi intersep (titik potong dengan sumbu Y) dan b menjadi kemiringan (*slope*) dari garis regresi. Dengan mengumpulkan data pasangan panjang dan berat dari sejumlah besar ikan (idealnya mencakup rentang ukuran yang luas), parameter a dan b dapat diestimasi dengan mudah menggunakan metode kuadrat terkecil (*least squares regression*).

Interpretasi Parameter Alometri (b)

Nilai eksponen b memberikan informasi kunci tentang bagaimana bentuk tubuh ikan berubah seiring dengan pertumbuhannya. Terdapat tiga kemungkinan skenario (Froese, 2006):

- a. Pertumbuhan Isometrik ($b = 3$): Jika b sama dengan 3, ini berarti ikan tumbuh secara isometrik. Artinya, bentuk tubuh dan densitasnya tetap konstan selama pertumbuhan. Ikan hanya menjadi versi yang lebih besar dari dirinya yang lebih muda, dengan semua dimensi tubuh

meningkat secara proporsional. Beratnya meningkat tepat sebanding dengan pangkat tiga dari panjangnya.

- b. Pertumbuhan Alometrik Positif ($b > 3$): Jika b secara signifikan lebih besar dari 3, ini menunjukkan pertumbuhan alometrik positif. Artinya, seiring dengan bertambahnya panjang, ikan cenderung menjadi relatif lebih "gemuk", "tinggi", atau "padat". Beratnya meningkat lebih cepat daripada pangkat tiga dari panjangnya.
- c. Pertumbuhan Alometrik Negatif ($b < 3$): Jika b secara signifikan lebih kecil dari 3, ini menunjukkan pertumbuhan alometrik negatif. Artinya, seiring dengan bertambahnya panjang, ikan cenderung menjadi relatif lebih "kurus" atau "ramping". Beratnya meningkat lebih lambat daripada pangkat tiga dari panjangnya. Ini sering terjadi pada spesies ikan yang memiliki bentuk tubuh memanjang (seperti belut) atau yang menjadi lebih ramping saat dewasa.

Secara teoritis, nilai b untuk sebagian besar spesies ikan diharapkan berada di sekitar 3, biasanya dalam rentang 2.5 hingga 3.5. Nilai di luar rentang ini mungkin mengindikasikan adanya masalah pada sampel data (misalnya, rentang ukuran yang terlalu sempit) atau karakteristik pertumbuhan yang sangat tidak biasa. Untuk menguji apakah nilai b yang diamati secara statistik berbeda dari 3, uji- t (t -test) dapat dilakukan.

Aplikasi Praktis Hubungan Panjang-Bobot

Setelah parameter a dan b untuk suatu stok telah diestimasi dengan andal, persamaan $W=aL^b$ menjadi alat kerja yang sangat berharga bagi ahli biologi dan manajer perikanan.

- a. Konversi Data Panjang ke Berat: Ini adalah aplikasi yang paling umum. Seringkali dalam survei atau pemantauan pendaratan, jauh lebih efisien untuk hanya mengukur panjang ribuan ikan (data frekuensi panjang) daripada menimbang semuanya. Dengan menggunakan persamaan LWR yang telah ditetapkan, seluruh distribusi frekuensi panjang ini dapat dengan cepat diubah menjadi distribusi frekuensi berat. Ini memungkinkan estimasi biomassa total dari hasil tangkapan atau dari populasi yang disurvei, yang merupakan informasi fundamental untuk penilaian stok.

Contoh: Misalkan untuk ikan kakap merah di suatu perairan, telah dihitung bahwa LWR-nya adalah $W=0.015 \cdot L^{2.9}$. Jika seorang peneliti mengukur seekor kakap dengan panjang 50 cm, ia dapat dengan cepat mengestimasi beratnya tanpa perlu menimbanginya: $W=0.015 \cdot (50)^{2.9} \approx 0.015 \cdot 108543.3 \approx 1628$ gram atau 1.63 kg.

- b. Estimasi Berat Ikan dari Pengukuran di Bawah Air: Dalam survei visual bawah air (misalnya, *underwater visual census* atau UVC) yang dilakukan oleh penyelam untuk memantau populasi ikan terumbu karang, menimbang ikan jelas tidak mungkin dilakukan. Penyelam hanya dapat mengestimasi panjang ikan yang mereka lihat. Dengan menggunakan LWR yang relevan, data estimasi panjang ini dapat diubah menjadi data biomassa, yang memungkinkan perhitungan kepadatan biomassa (misalnya, ton per hektar) untuk seluruh komunitas ikan karang.
- c. Indikator Kesehatan Populasi: Parameter a dan b itu sendiri dapat memberikan wawasan. Jika parameter LWR untuk suatu stok dibandingkan dari tahun ke tahun, perubahan yang signifikan mungkin mengindikasikan adanya perubahan dalam kondisi lingkungan atau kesehatan populasi. Misalnya, penurunan nilai a atau b dari waktu ke waktu mungkin menunjukkan bahwa ikan menjadi lebih kurus karena ketersediaan makanan yang menurun atau kepadatan populasi yang terlalu tinggi.

Pentingnya Spesifisitas Lokal: Penting untuk ditekankan kembali bahwa penggunaan parameter LWR yang "dipinjam" dari studi lain atau lokasi lain harus dilakukan dengan sangat hati-hati. Parameter a dan b dapat sangat bervariasi tergantung pada faktor-faktor seperti ketersediaan makanan, suhu, musim, dan status kematangan gonad (ikan yang matang gonad akan lebih berat untuk panjang yang sama). Idealnya, parameter LWR harus dihitung untuk setiap stok, jenis kelamin, dan musim secara terpisah jika memungkinkan. Basis data global seperti FishBase menyediakan ribuan set parameter LWR untuk berbagai spesies di seluruh dunia, yang dapat digunakan sebagai referensi awal, tetapi estimasi lokal selalu lebih diutamakan jika data tersedia.

Faktor Kondisi (Condition Factor)

Hubungan panjang-bobot menyediakan dasar untuk menghitung indeks lain yang sangat berguna yang disebut Faktor Kondisi (K). Faktor kondisi adalah indeks kuantitatif yang digunakan untuk menilai "kesehatan", "kegemukan", atau kesejahteraan (*well-being*) umum dari seekor ikan atau populasi ikan. Ide dasarnya adalah bahwa untuk panjang tertentu, ikan yang lebih berat berada dalam kondisi yang lebih baik daripada ikan yang lebih ringan.

Perubahan faktor kondisi dapat mencerminkan:

- a. Ketersediaan Makanan: Faktor kondisi sering kali tinggi ketika makanan melimpah dan rendah selama periode kelaparan.
- b. Siklus Reproduksi: Faktor kondisi sering kali meningkat sebelum pemijahan seiring dengan berkembangnya gonad (yang menambah berat) dan kemudian turun setelah pemijahan karena pengeluaran energi dan gamet.
- c. Kondisi Lingkungan: Stresor lingkungan seperti kualitas air yang buruk atau suhu yang tidak optimal dapat menyebabkan penurunan faktor kondisi.
- d. Tingkat Parasitisme atau Penyakit: Ikan yang sakit atau terinfeksi berat oleh parasit sering kali menunjukkan faktor kondisi yang rendah.

Dengan melacak perubahan rata-rata faktor kondisi dari suatu populasi dari waktu ke waktu atau membandingkannya antar lokasi, para ilmuwan dapat memperoleh wawasan berharga tentang dinamika ekologis yang mempengaruhi populasi tersebut. Ada beberapa cara untuk menghitung faktor kondisi, yang paling umum adalah Faktor Kondisi Fulton dan Faktor Kondisi Relatif.

1) Faktor Kondisi Fulton (K)

Ini adalah metode yang paling tua dan paling sederhana, pertama kali diusulkan oleh Fulton pada awal abad ke-20. Metode ini didasarkan pada asumsi bahwa pertumbuhan ikan bersifat **isometrik** (yaitu, nilai b dalam persamaan LWR sama dengan 3). Rumusnya adalah:

$$K=L^3W \times C$$

dimana:

- (a) W adalah berat ikan (dalam gram).
- (b) L adalah panjang ikan (dalam sentimeter).
- (c) C adalah faktor skalar (konstanta) yang digunakan untuk membawa nilai K ke angka yang lebih mudah dikelola (biasanya di sekitar 1). Nilai C yang umum digunakan adalah 100,000 (jika W dalam gram dan L dalam milimeter) atau 100 (jika W dalam gram dan L dalam sentimeter).

Kelebihan Faktor Kondisi Fulton:

- (a) Sederhana: Sangat mudah dihitung.
- (b) Historis: Telah digunakan secara luas dalam literatur lama, sehingga memungkinkan perbandingan dengan studi-studi sebelumnya.

Kelemahan Faktor Kondisi Fulton:

Kelemahan utamanya terletak pada asumsi pertumbuhan isometrik ($b=3$). Seperti yang telah kita lihat, banyak spesies ikan tidak tumbuh secara isometrik. Jika seekor ikan secara alami tumbuh dengan alometrik negatif ($b < 3$, menjadi lebih ramping seiring pertumbuhan), maka faktor kondisi Fulton-nya akan secara artifisial menurun seiring dengan bertambahnya ukuran, bahkan jika ikan tersebut dalam kondisi kesehatan yang sempurna. Sebaliknya, untuk ikan dengan alometrik positif ($b > 3$), nilai K akan meningkat seiring ukuran. Ketergantungan pada panjang ini membuat perbandingan faktor kondisi antara ikan dengan ukuran yang berbeda menjadi tidak valid dan dapat menyesatkan. Karena keterbatasan ini, penggunaan Faktor Kondisi Fulton saat ini kurang dianjurkan kecuali jika telah terbukti bahwa spesies yang diteliti memang tumbuh secara isometrik.

2) Faktor Kondisi Relatif (K_n)

Untuk mengatasi masalah ketergantungan pada panjang yang melekat pada Faktor Kondisi Fulton, Le Cren (1951) mengusulkan Faktor Kondisi Relatif (K_n). Metode ini secara eksplisit memperhitungkan pola pertumbuhan alometrik yang sebenarnya dari populasi. K_n didefinisikan sebagai rasio antara berat aktual seekor ikan (W) dengan berat yang diprediksi (W') untuk

ikan dengan panjang yang sama, di mana berat yang diprediksi dihitung dari persamaan hubungan panjang-bobot spesifik populasi tersebut.

Rumusnya adalah:

$$K_n = W/W'$$

dimana:

- (a) W adalah berat aktual (yang diamati) dari seekor ikan.
- (b) W' adalah berat yang diprediksi, dihitung menggunakan persamaan LWR: $W' = aL^b$. Parameter a dan b adalah nilai yang diestimasi dari regresi panjang-bobot untuk seluruh populasi sampel.

Interpretasi Faktor Kondisi Relatif (K_n):

- (a) $K_n = 1$: Menunjukkan bahwa ikan tersebut memiliki berat yang sama dengan berat rata-rata yang diharapkan untuk ikan dengan panjang tersebut dalam populasi itu. Ini dianggap sebagai kondisi "rata-rata".
- (b) $K_n > 1$: Menunjukkan bahwa ikan tersebut lebih berat daripada rata-rata untuk panjangnya. Ini mengindikasikan kondisi yang baik.
- (c) $K_n < 1$: Menunjukkan bahwa ikan tersebut lebih ringan daripada rata-rata untuk panjangnya. Ini mengindikasikan kondisi yang kurang baik.

Keuntungan Faktor Kondisi Relatif:

Keuntungan utama K_n adalah bahwa ia secara teoritis tidak bergantung pada panjang ikan. Dengan menormalisasi berat aktual terhadap berat yang diharapkan (yang sudah memperhitungkan alometri), K_n memungkinkan perbandingan kondisi yang valid antara ikan-ikan dengan ukuran yang sangat berbeda. Ini juga memungkinkan perbandingan yang lebih bermakna antara populasi yang berbeda atau dari waktu ke waktu.

Penggunaan dalam Analisis: Dalam praktiknya, peneliti akan menghitung nilai K_n untuk setiap individu dalam sampel. Kemudian, nilai rata-rata K_n dapat dihitung untuk setiap bulan, lokasi, atau kelompok umur. Plot rata-rata K_n bulanan sering kali menunjukkan pola yang sangat informatif. Misalnya, pada banyak spesies, rata-rata K_n akan meningkat secara stabil menjelang musim pemijahan (karena perkembangan gonad dan penyimpanan energi) dan kemudian turun tajam setelah pemijahan. Pola ini dapat digunakan sebagai konfirmasi independen untuk musim reproduksi

yang diidentifikasi melalui analisis IKG. Demikian pula, membandingkan rata-rata K_n antara dua teluk yang berbeda mungkin mengungkapkan bahwa satu teluk menyediakan kondisi pakan yang lebih baik daripada yang lain.

Singkatnya, hubungan panjang-bobot dan faktor kondisi adalah alat analisis yang relatif sederhana namun sangat kuat. Mereka mengubah data dasar panjang dan berat menjadi wawasan biologis tentang pola pertumbuhan, kesehatan, dan bagaimana ikan merespons dinamika lingkungan dan siklus hidup internal mereka. Informasi ini, bila digabungkan dengan data umur, akan menjadi dasar untuk membangun model pertumbuhan yang lebih komprehensif, seperti model *von Bertalanffy*, yang merupakan topik pada bagian selanjutnya.

2. Model Pertumbuhan *von Bertalanffy* dan Parameter Pertumbuhan (L_∞, K, t_0)

Setelah mengumpulkan data pasangan umur dan panjang dari suatu populasi, langkah selanjutnya adalah mensintesis informasi tersebut ke dalam sebuah kerangka kerja matematis yang dapat mendeskripsikan pola pertumbuhan secara umum. Meskipun plot sederhana dari panjang terhadap umur sudah memberikan gambaran visual, sebuah model pertumbuhan memberikan beberapa keuntungan signifikan:

- a. Deskripsi Kuantitatif: Model merangkum pola pertumbuhan yang kompleks ke dalam beberapa parameter yang dapat diinterpretasikan secara biologis.
- b. Prediksi: Model memungkinkan kita untuk memprediksi panjang rata-rata ikan pada umur berapa pun, bahkan pada umur yang mungkin tidak terwakili dalam sampel kita.
- c. Perbandingan: Parameter dari model memungkinkan perbandingan pola pertumbuhan yang objektif antar populasi, antar jenis kelamin, atau dari waktu ke waktu.
- d. Integrasi: Kurva pertumbuhan yang dihasilkan merupakan komponen esensial yang akan diintegrasikan ke dalam model-model penilaian stok yang lebih kompleks, seperti model hasil per rekrut (*yield-per-recruit*) atau analisis kohort virtual.

Sejumlah model matematis telah diusulkan untuk menggambarkan pertumbuhan ikan, termasuk model Gompertz dan model logistik. Namun, model yang sejauh ini paling dominan dan paling banyak digunakan dalam ilmu perikanan di seluruh dunia adalah Fungsi Pertumbuhan von Bertalanffy (*von Bertalanffy Growth Function* - VBGF).

Model ini pertama kali dikembangkan oleh ahli biologi Ludwig von Bertalanffy pada tahun 1938, berdasarkan pertimbangan fisiologis tentang keseimbangan antara proses anabolisme (pembangunan jaringan tubuh) dan katabolisme (pemecahan jaringan untuk energi). Ia berargumen bahwa laju anabolisme sebanding dengan luas permukaan tubuh (tempat nutrisi diserap), sedangkan laju katabolisme sebanding dengan massa atau volume tubuh. Karena volume meningkat lebih cepat daripada luas permukaan seiring pertumbuhan organisme, pada akhirnya akan tercapai titik di mana laju pembangunan sama dengan laju pemecahan, dan pertumbuhan berhenti.

Meskipun dasar fisiologis aslinya masih menjadi perdebatan, persamaan yang dihasilkan dari teori ini terbukti sangat fleksibel dan sangat baik dalam mendeskripsikan pola pertumbuhan tak tentu pada sebagian besar spesies ikan. Bentuk kurva VBGF yang khas adalah kurva sigmoid terbalik, di mana pertumbuhan pada awalnya cepat, kemudian melambat secara progresif seiring ikan mendekati ukuran maksimumnya. Kemampuannya untuk mendeskripsikan pola ini dengan baik, ditambah dengan kemudahan integrasinya ke dalam model perikanan lain (seperti model Beverton dan Holt), telah menjadikan VBGF sebagai "alat kerja standar" dalam analisis pertumbuhan ikan.

Persamaan Pertumbuhan von Bertalanffy

Persamaan VBGF yang paling umum digunakan menggambarkan hubungan antara panjang ikan (L_t) dan umurnya (t). Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$L_t = L_{\infty}(1 - e^{-K(t-t_0)})$$

dimana:

- a. L_t adalah panjang ikan pada umur t . Ini adalah variabel dependen, yaitu nilai yang ingin kita prediksi.

- b. L_{∞} (L-infinity) adalah panjang asimtotik. Ini adalah parameter yang merepresentasikan panjang rata-rata maksimum teoretis yang akan dicapai oleh ikan dalam populasi tersebut jika mereka hidup selamanya. Kurva pertumbuhan akan mendekati nilai ini tetapi tidak pernah benar-benar melampauinya.
- c. K adalah koefisien pertumbuhan. Ini adalah parameter laju yang menentukan seberapa cepat ikan mendekati panjang asimtotiknya (L_{∞}). Nilai K yang tinggi menunjukkan pertumbuhan yang cepat menuju L_{∞} , sementara nilai K yang rendah menunjukkan pertumbuhan yang lambat. Satuan K adalah per unit waktu (misalnya, per tahun atau tahun⁻¹).
- d. t adalah umur ikan. Ini adalah variabel independen.
- e. t_0 (t-nought atau t-zero) adalah umur teoretis di mana panjang ikan adalah nol. Ini adalah parameter matematis yang menggeser kurva di sepanjang sumbu waktu (sumbu X) untuk memberikan kecocokan terbaik dengan data. Ia tidak merepresentasikan peristiwa biologis yang nyata dan sering kali memiliki nilai negatif.

Tiga parameter— L_{∞} , K , dan t_0 —adalah konstanta yang diestimasi dari data pasangan umur-panjang. Setelah nilai-nilai ini diketahui untuk suatu populasi, kita dapat memprediksi panjang rata-rata ikan pada umur berapa pun hanya dengan memasukkan nilai umur (t) ke dalam persamaan.

Visualisasi Kurva VBGF

Kurva VBGF memiliki bentuk yang sangat khas. Ketika diplot dengan umur pada sumbu X dan panjang pada sumbu Y , kurva dimulai dari dekat titik nol (atau nilai negatif, tergantung pada t_0), kemudian naik dengan cepat pada umur-umur awal. Seiring bertambahnya umur, kemiringan kurva menjadi semakin landai, yang menunjukkan bahwa laju pertumbuhan (penambahan panjang per tahun) menurun. Akhirnya, kurva menjadi hampir horizontal saat mendekati garis putus-putus yang mewakili L_{∞} . Laju di mana kurva “membengkok” untuk mendekati L_{∞} ditentukan oleh nilai K . Kurva dengan K tinggi akan membengkok lebih tajam dan mencapai L_{∞} lebih cepat, sedangkan kurva dengan K rendah akan naik lebih landai dan membutuhkan waktu lebih lama untuk mendekati L_{∞} .

. Memahami interpretasi biologis dari setiap parameter ini adalah kunci untuk memanfaatkan kekuatan model VBGF.

Interpretasi Parameter Pertumbuhan: L_{∞} (Panjang Asimtotik)

Parameter L_{∞} (diucapkan "L-infinity") adalah salah satu parameter yang paling penting dan paling sering dikutip dari model VBGF. Secara matematis, ini adalah nilai asimtot dari fungsi pertumbuhan, yaitu nilai yang didekati oleh L_t ketika t menuju tak terhingga. Secara biologis, L_{∞} merepresentasikan panjang rata-rata maksimum yang dapat dicapai oleh ikan dalam suatu populasi di bawah kondisi lingkungan tertentu.

Penting untuk memahami beberapa nuansa tentang L_{∞} :

- a. Bukan Ukuran Maksimum Absolut: L_{∞} bukanlah panjang maksimum absolut yang pernah tercatat untuk seekor ikan. Sangat mungkin untuk menemukan beberapa individu dalam populasi yang memiliki panjang sedikit lebih besar dari nilai L_{∞} yang diestimasi. Ingatlah bahwa L_{∞} adalah parameter rata-rata untuk seluruh populasi. Variabilitas individu dalam pertumbuhan berarti beberapa ikan akan tumbuh sedikit lebih besar dan beberapa akan tumbuh sedikit lebih kecil dari rata-rata ini.
- b. Spesifik Populasi: Nilai L_{∞} tidak bersifat universal untuk suatu spesies. Populasi dari spesies yang sama yang hidup di lingkungan yang berbeda dapat memiliki nilai L_{∞} yang sangat berbeda. Misalnya, populasi ikan kakap yang hidup di perairan yang kaya makanan dan memiliki kepadatan rendah mungkin memiliki L_{∞} yang lebih besar daripada populasi di perairan yang miskin sumber daya dan padat.
- c. Dipengaruhi oleh Genetika dan Lingkungan: L_{∞} adalah hasil dari interaksi antara potensi genetik untuk tumbuh dan kondisi lingkungan yang mendukung atau menghambat pertumbuhan tersebut. Faktor-faktor seperti suhu air, ketersediaan dan kualitas makanan, kepadatan populasi, dan tingkat oksigen semuanya dapat mempengaruhi L_{∞} yang dapat dicapai.

Kepentingan dalam Pengelolaan Perikanan Nilai L_{∞} memiliki relevansi praktis yang besar. Ia berfungsi sebagai titik referensi biologis yang penting. Dalam populasi yang belum dieksploitasi atau dieksploitasi secara ringan, struktur ukuran populasi akan cenderung didominasi oleh ikan-ikan yang

berukuran mendekati L_{∞} . Sebaliknya, dalam populasi yang mengalami tekanan penangkapan yang berat (*heavily exploited*), ikan-ikan besar yang mendekati L_{∞} akan menjadi sangat langka, dan distribusi ukuran akan bergeser ke arah ikan-ikan yang lebih kecil dan lebih muda. Oleh karena itu, perbandingan antara struktur ukuran hasil tangkapan saat ini dengan nilai L_{∞} yang diketahui dapat memberikan indikasi kasar tentang tingkat eksploitasi suatu stok.

Selain itu, estimasi L_{∞} yang andal sangat penting untuk model-model lain. Dalam model hasil per rekrut, L_{∞} digunakan untuk mensimulasikan bagaimana biomassa suatu kohort berubah seiring waktu, yang pada gilirannya digunakan untuk menentukan ukuran tangkap optimum. Kesalahan dalam mengestimasi L_{∞} akan menjalar dan menyebabkan kesalahan dalam rekomendasi pengelolaan.

Interpretasi Parameter Pertumbuhan: K (Koefisien Pertumbuhan)

Jika L_{∞} memberitahu kita seberapa besar ikan dapat tumbuh, maka parameter K memberitahu kita seberapa cepat mereka mencapai ukuran tersebut. Koefisien pertumbuhan K, sering juga disebut *growth coefficient* atau *curvature parameter*, adalah parameter laju yang menggambarkan tingkat di mana L_t mendekati L_{∞} .

Interpretasi Biologis K:

- a. Nilai K Tinggi: Menunjukkan bahwa ikan tumbuh dengan sangat cepat pada usia muda dan mencapai panjang asimtotiknya dalam waktu yang relatif singkat. Kurva pertumbuhannya akan menanjak dengan sangat curam pada awalnya dan kemudian membengkok tajam. Spesies dengan nilai K tinggi biasanya adalah ikan yang:
 - 1) Berukuran kecil.
 - 2) Memiliki masa hidup yang pendek (misalnya, 1-3 tahun).
 - 3) Cepat matang secara seksual.
 - 4) Contoh: Ikan teri, sarden, dan ikan pelagis kecil lainnya.
- b. Nilai K Rendah: Menunjukkan bahwa ikan tumbuh dengan lambat tetapi stabil dalam periode waktu yang lama. Kurva pertumbuhannya akan naik secara lebih landai dan membutuhkan waktu bertahun-

tahun atau bahkan berpuluh-puluh tahun untuk mendekati L_{∞} . Spesies dengan nilai K rendah biasanya adalah ikan yang:

- 1) Berukuran besar.
- 2) Memiliki masa hidup yang panjang (misalnya, >20 tahun).
- 3) Lambat untuk mencapai kematangan seksual.
- 4) Contoh: Ikan kerapu, kakap, dan banyak ikan demersal besar serta ikan hiu.

Dengan demikian, nilai K adalah cerminan dari strategi sejarah kehidupan (*life history strategy*) suatu spesies. Spesies dengan strategi "hidup cepat, mati muda" akan memiliki K yang tinggi, sementara spesies dengan strategi "tumbuh lambat, hidup lama" akan memiliki K yang rendah.

Kepentingan dalam Pengelolaan Perikanan Nilai K sangat krusial untuk memahami produktivitas dan ketahanan (*resilience*) suatu stok terhadap tekanan penangkapan.

- 1) Stok dengan K Tinggi: Stok ini cenderung memiliki produktivitas yang tinggi. Karena mereka tumbuh dan matang dengan cepat, mereka dapat pulih dari penurunan populasi dengan lebih cepat (jika kondisi lingkungan mendukung). Mereka sering kali dapat menahan laju eksploitasi yang lebih tinggi.
- 2) Stok dengan K Rendah: Stok ini memiliki produktivitas yang rendah dan sangat rentan terhadap penangkapan berlebih. Karena mereka membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk tumbuh dan matang, sekali populasi mereka terkuras, pemulihannya akan memakan waktu yang sangat lama. Stok dengan K rendah memerlukan pendekatan pengelolaan yang jauh lebih konservatif dan hati-hati.

Banyak dari kasus kolapsnya perikanan di dunia terjadi pada spesies dengan nilai K yang rendah (seperti ikan *Orange Roughy* di Selandia Baru, yang dapat hidup lebih dari 100 tahun dan memiliki K yang sangat rendah). Para manajer pada awalnya memperlakukan mereka seolah-olah mereka produktif, yang menyebabkan penipisan stok secara drastis sebelum biologi mereka yang sebenarnya dipahami. Ini menyoroti betapa pentingnya estimasi K yang akurat sejak awal dalam pengembangan suatu perikanan.

Hubungan Timbal Balik (Trade-off) antara K dan L_{∞}

Secara umum, dalam dunia ikan, terdapat hubungan timbal balik atau *trade-off* yang kuat antara parameter K dan L_{∞} . Sangat jarang ditemukan spesies yang memiliki nilai K dan nilai L_{∞} yang sama-sama sangat tinggi. Sebaliknya, biasanya terdapat hubungan negatif: spesies dengan L_{∞} yang besar cenderung memiliki K yang kecil, dan spesies dengan K yang besar cenderung memiliki L_{∞} yang kecil.

Hubungan ini masuk akal dari sudut pandang alokasi energi. Energi yang diperoleh ikan dari makanan harus dialokasikan untuk berbagai kebutuhan: pemeliharaan metabolisme dasar, aktivitas (berenang, mencari makan), pertumbuhan, dan reproduksi. Tumbuh hingga ukuran yang sangat besar (L_{∞} tinggi) membutuhkan investasi energi yang besar dan berkelanjutan selama periode waktu yang lama, yang secara inheren berarti laju pertumbuhan relatifnya (K) harus lebih lambat. Sebaliknya, mencapai ukuran dewasa yang lebih kecil dengan cepat (K tinggi, L_{∞} kecil) adalah strategi alternatif yang memprioritaskan reproduksi dini daripada pertumbuhan somatik jangka panjang.

Indeks Kinerja Pertumbuhan (Growth Performance Index) Untuk membandingkan kinerja pertumbuhan antar spesies atau stok yang berbeda, menggunakan K atau L_{∞} secara terpisah bisa menyesatkan karena adanya trade-off ini. Untuk mengatasi hal ini, Pauly dan Munro (1984) mengusulkan Indeks Kinerja Pertumbuhan, yang dikenal sebagai phi prime (ϕ'). Indeks ini menggabungkan informasi dari L_{∞} dan K ke dalam satu metrik tunggal.

Persamaannya adalah:

$$\phi' = \log_{10}(K) + 2 \cdot \log_{10}(L_{\infty})$$

Keunggulan dari ϕ' adalah nilainya cenderung relatif konstan untuk spesies-spesies yang berkerabat dekat atau dalam satu famili taksonomi, bahkan jika nilai K dan L_{∞} masing-masing sangat bervariasi antar populasi. Misalnya, berbagai populasi ikan kembung dari lokasi yang berbeda mungkin memiliki pasangan nilai (K, L_{∞}) yang berbeda karena kondisi lingkungan lokal, tetapi nilai ϕ' mereka akan cenderung sangat mirip.

Indeks ϕ' memiliki beberapa aplikasi praktis:

- a. Memeriksa Keandalan Estimasi: Jika Anda menghitung parameter pertumbuhan untuk suatu stok dan nilai ϕ' yang dihasilkan sangat berbeda dari nilai yang dilaporkan untuk spesies atau famili yang sama di lokasi lain (misalnya, dari data di FishBase), ini bisa menjadi pertanda bahwa estimasi K atau L_{∞} Anda mungkin keliru.
- b. Mengestimasi Parameter yang Hilang: Jika Anda memiliki estimasi yang andal untuk L_{∞} tetapi kesulitan mendapatkan estimasi K yang baik, Anda dapat menggunakan nilai ϕ' rata-rata untuk famili tersebut untuk mendapatkan perkiraan kasar nilai K .

Dengan demikian, ϕ' berfungsi sebagai alat yang berguna untuk memeriksa konsistensi hasil dan untuk memanfaatkan pengetahuan kolektif tentang pola pertumbuhan ikan.

Interpretasi Parameter Pertumbuhan: t_0 (t-zero)

Parameter ketiga dari VBGF, t_0 , sering kali merupakan yang paling sulit untuk dipahami secara intuitif. Secara matematis, t_0 adalah parameter lokasi yang menggeser kurva pertumbuhan ke kiri atau ke kanan di sepanjang sumbu umur (sumbu X). Definisinya yang paling harfiah adalah "umur teoretis di mana panjang ikan adalah nol".

Sifat Abstrak t_0 Penting untuk ditekankan bahwa t_0 bukanlah parameter biologis yang dapat diamati secara langsung seperti L_{∞} atau K . Ia lebih merupakan "artefak" atau "faktor koreksi" dari proses pemasangan kurva (*fitting*). Persamaan VBGF mengasumsikan bahwa pola pertumbuhan mengikuti kurva sigmoid terbalik yang sama sepanjang hidup ikan. Namun, pada kenyataannya, pertumbuhan pada tahap paling awal (larva) sering kali mengikuti pola yang berbeda (misalnya, eksponensial) sebelum beralih ke pola von Bertalanffy.

Parameter t_0 berfungsi untuk menyesuaikan kurva agar paling cocok dengan data umur dan panjang dari ikan yang lebih tua, yang merupakan data utama yang digunakan untuk memodelkan pertumbuhan populasi yang dieksploitasi. Karena alasan ini, nilai t_0 sering kali negatif. Nilai negatif tidak berarti ikan memiliki "umur negatif". Ini hanya berarti bahwa jika kita mengekstrapolasi kurva *von Bertalanffy* ke belakang menuju panjang nol, kurva tersebut akan memotong sumbu umur pada nilai negatif. Ini

mencerminkan fakta bahwa ukuran ikan pada saat menetas (umur $t=0$) sebenarnya lebih besar dari nol.

Kepentingan dalam Pengelolaan Perikanan Dibandingkan dengan L_{∞} dan K , parameter t_0 memiliki kepentingan yang jauh lebih kecil dalam sebagian besar aplikasi pengelolaan perikanan. Kesalahan kecil dalam estimasi t_0 biasanya memiliki dampak yang dapat diabaikan pada hasil model penilaian stok, selama L_{∞} dan K diestimasi dengan benar. Estimasi t_0 juga cenderung memiliki ketidakpastian statistik yang paling tinggi, terutama jika tidak ada data dari ikan yang sangat muda (umur 0 atau 1) dalam sampel.

Namun, ada beberapa situasi di mana t_0 bisa berguna. Dengan memiliki ketiga parameter, kita dapat menata ulang persamaan VBGF untuk menghitung umur teoretis (t) untuk setiap panjang yang diberikan (L_t):

$$t = t_0 - K^{-1} \ln(1 - L_{\infty} L_t)$$

Persamaan ini dapat digunakan untuk membuat kunci umur-panjang (*age-length key*), di mana panjang dapat "diterjemahkan" menjadi umur rata-rata.

Secara ringkas, sementara L_{∞} dan K menggambarkan aspek-aspek fundamental dari biologi pertumbuhan dan sejarah kehidupan, t_0 paling baik dipandang sebagai parameter penyesuaian yang diperlukan untuk melengkapi model matematis, dengan signifikansi biologis langsung yang terbatas.

Metode untuk Mengestimasi Parameter Pertumbuhan

Setelah data pasangan umur-panjang dikumpulkan, tugas berikutnya adalah menemukan nilai-nilai parameter L_{∞} , K , dan t_0 yang menghasilkan kurva VBGF yang paling sesuai (*best fit*) dengan data observasi. Ada beberapa metode untuk mencapai ini, mulai dari pendekatan grafis historis hingga metode statistik non-linier yang canggih yang menjadi standar saat ini.

Tujuan dari semua metode ini adalah untuk meminimalkan selisih antara panjang yang diamati di lapangan (L_{obs}) dan panjang yang diprediksi oleh model (L_{pred}) untuk setiap umur. Selisih ini disebut residu. Metode

“best fit” adalah metode yang meminimalkan jumlah kuadrat dari semua residu (disebut *Sum of Squared Residuals* atau SSR).

$$SSR = \sum (L_{obs} - L_{pred})^2$$

- a. Metode Coba-coba (*Trial and Error*): Metode paling dasar adalah dengan secara manual mencoba berbagai kombinasi nilai L_{∞} dan K , memplot kurva yang dihasilkan di atas data, dan secara visual menilai mana yang paling cocok. Metode ini sangat tidak efisien, subjektif, dan tidak mungkin menemukan solusi optimal. Namun, ini bisa menjadi langkah awal yang berguna untuk mendapatkan “perasaan” tentang rentang nilai parameter yang masuk akal.
- b. Metode Linierisasi (*Linearization Methods*): Sebelum komputer menjadi alat yang umum, para ilmuwan mengembangkan cara-cara cerdas untuk mengubah persamaan VBGF yang non-linier menjadi bentuk garis lurus (linier). Regresi linier jauh lebih mudah dihitung dengan tangan atau kalkulator sederhana. Metode linierisasi yang paling terkenal adalah Plot Ford-Walford. Metode ini, meskipun sekarang sebagian besar telah digantikan, penting untuk dipahami dari perspektif historis dan konseptual.
- c. Metode Non-Linier (*Non-linear Regression*): Ini adalah pendekatan modern dan yang paling disukai secara statistik. Alih-alih melinearkan persamaan, metode ini secara langsung bekerja dengan persamaan VBGF asli ($L_t = L_{\infty}(1 - e^{-K(t-t_0)})$). Metode ini menggunakan algoritma iteratif berbasis komputer untuk secara sistematis mencari kombinasi parameter (L_{∞} , K , t_0) yang secara langsung meminimalkan SSR. Karena ia bekerja dengan persamaan asli, metode ini menghindari masalah statistik yang dapat timbul dari proses transformasi logaritmik atau linierisasi. Hampir semua perangkat lunak analisis perikanan modern (seperti R, FISAT II, atau paket statistik lainnya) menggunakan pendekatan non-linier untuk fitting kurva pertumbuhan. Pengguna biasanya hanya perlu menyediakan data umur-panjang dan nilai awal tebakan untuk parameter, dan perangkat lunak akan melakukan sisanya.

Detail Metode Linierisasi: *Plot Ford-Walford*

Plot Ford-Walford adalah metode grafis cerdas yang dikembangkan pada tahun 1940-an untuk mengestimasi L_{∞} dan K tanpa perlu melakukan regresi non-linier yang rumit. Metode ini didasarkan pada penataan ulang persamaan VBGF.

Dasar Matematis: Persamaan VBGF dapat ditulis ulang untuk menghubungkan panjang pada umur $t+1$ dengan panjang pada umur t . Dengan sedikit aljabar, dapat ditunjukkan bahwa:

$$L_{t+1} = L_{\infty}(1 - e^{-K}) + e^{-K}L_t$$

Perhatikan bahwa persamaan ini sekarang memiliki bentuk persamaan garis lurus, $y = a + bx$, di mana:

- $y = L_{t+1}$ (panjang pada umur $t+1$)
- $x = L_t$ (panjang pada umur t)
- a (intersep) = $L_{\infty}(1 - e^{-K})$
- b (kemiringan/slope) = e^{-K}

Prosedur:

- Siapkan data pasangan panjang rata-rata pada setiap umur (misalnya, panjang rata-rata pada umur 1, 2, 3, dst.).
- Buat plot sebar (scatter plot) dengan L_t pada sumbu X dan L_{t+1} pada sumbu Y. Misalnya, titik pertama adalah (panjang rata-rata umur 1, panjang rata-rata umur 2), titik kedua adalah (panjang rata-rata umur 2, panjang rata-rata umur 3), dan seterusnya.
- Titik-titik ini seharusnya membentuk garis yang kurang lebih lurus. Lakukan analisis regresi linier pada titik-titik ini untuk mendapatkan nilai intersep (a) dan kemiringan (b).
- Setelah mendapatkan a dan b , hitung parameter K dan L_{∞} sebagai berikut:
 - Dari kemiringan, $K = -\ln(b)$
 - Dari intersep, $L_{\infty} = 1 - ba$

Selain itu, plot Ford-Walford memberikan cara grafis yang bagus untuk mengestimasi L_{∞} . Jika Anda memplot garis identitas (garis $y=x$, di mana $L_{t+1}=L_t$) pada grafik yang sama, titik di mana garis regresi Ford-Walford

memotong garis identitas secara teoretis adalah nilai dari L_{∞} . Ini karena pada saat ikan mencapai panjang asimtotiknya, pertumbuhannya berhenti, sehingga $L_{t+1} = L_t = L_{\infty}$.

Keterbatasan: Meskipun cerdas, metode ini memiliki beberapa kelemahan statistik. Ia mengasumsikan bahwa kesalahan pengukuran hanya ada pada variabel Y (L_{t+1}), padahal kenyataannya kesalahan juga ada pada variabel X (L_t). Selain itu, titik-titik data tidak sepenuhnya independen (karena L_t pada satu titik menjadi L_{t+1} pada titik berikutnya), dan kesalahan dapat terakumulasi. Karena alasan ini, metode non-linier modern lebih disukai, tetapi plot Ford-Walford tetap menjadi alat visualisasi dan pengajaran yang berguna.

Detail Metode Non-Linier

Seperti yang disebutkan, regresi non-linier adalah standar emas saat ini untuk memasang kurva VBGF. Proses ini, yang ditangani oleh perangkat lunak komputer, pada dasarnya adalah pencarian cerdas untuk menemukan puncak (atau lembah) dalam lanskap statistik.

Proses Iteratif:

- a. Nilai Awal (*Starting Values*): Algoritma memerlukan tebakan awal untuk parameter L_{∞} , K , dan t_0 . Kualitas tebakan awal ini bisa penting; tebakan yang buruk dapat menyebabkan algoritma gagal menemukan solusi atau menemukan solusi yang salah (disebut local minimum). Untungnya, kita dapat memperoleh tebakan awal yang baik dari metode lain. Misalnya, L_{∞} dapat diperkirakan dari panjang maksimum yang diamati dalam sampel, dan K serta t_0 dapat diperkirakan dari plot Ford-Walford atau metode lain.
- b. Iterasi Pertama: Menggunakan nilai awal, algoritma menghitung panjang yang diprediksi (L_{pred}) untuk setiap data umur observasi dan menghitung total Sum of Squared Residuals (SSR).
- c. Penyesuaian Parameter: Algoritma kemudian secara sistematis menyesuaikan nilai-nilai parameter (misalnya, sedikit menaikkan K , sedikit menurunkan L_{∞}) ke arah yang akan mengurangi nilai SSR. Arah dan besarnya penyesuaian ini ditentukan oleh algoritma optimisasi yang kompleks (seperti metode turunan parsial).

- d. Konvergensi: Langkah 2 dan 3 diulang berkali-kali (iterasi). Pada setiap iterasi, nilai SSR akan semakin kecil. Proses ini berhenti ketika penyesuaian lebih lanjut pada parameter tidak lagi secara signifikan mengurangi nilai SSR. Pada titik ini, algoritma dikatakan telah mencapai konvergensi, dan nilai-nilai parameter terakhir adalah estimasi terbaik yang meminimalkan SSR.

Keuntungan Regresi *Non-Linier*:

- a. Akurasi Statistik: Metode ini secara statistik lebih tepat karena bekerja langsung dengan model asli dan asumsi kesalahannya.
- b. Output Komprehensif: Selain memberikan estimasi parameter terbaik, perangkat lunak biasanya juga menyediakan ukuran ketidakpastian untuk setiap parameter, seperti standard error dan confidence intervals (interval kepercayaan). Ini sangat penting karena memberitahu kita seberapa besar keyakinan yang bisa kita miliki pada nilai-nilai yang diestimasi.
- c. Fleksibilitas: Mudah untuk membandingkan model-model yang berbeda (misalnya, membandingkan kurva pertumbuhan untuk jantan dan betina) menggunakan kerangka kerja statistik yang kuat.

Singkatnya, meskipun memahami logika di balik metode grafis seperti plot Ford-Walford itu berguna, dalam praktik penelitian modern, pemasangan kurva pertumbuhan harus dilakukan dengan menggunakan metode regresi non-linier untuk memastikan hasil yang paling andal dan dapat dipertahankan secara statistik.

Fungsi Pertumbuhan *von Bertalanffy* untuk Berat

Sejauh ini, kita telah berfokus pada pertumbuhan panjang. Namun, sering kali kita juga tertarik pada pertumbuhan berat. Untungnya, kita tidak perlu memulai dari awal. Kita dapat dengan mudah menurunkan persamaan pertumbuhan untuk berat dengan menggabungkan dua model yang telah kita pelajari: Fungsi Pertumbuhan von Bertalanffy untuk Panjang dan Hubungan Panjang-Bobot.

Kita mulai dengan dua persamaan:

1) LWR: $W_t = aL_t^b$

$$2) \text{ VBGF: } L_t = L_\infty(1 - e^{-K(t-t_0)})$$

Dengan mensubstitusikan persamaan VBGF (2) ke dalam L_t pada persamaan LWR (1), kita mendapatkan:

$$W_t = a[L_\infty(1 - e^{-K(t-t_0)})]^b$$

Yang dapat disederhanakan menjadi:

$$W_t = (aL_\infty^b) \cdot (1 - e^{-K(t-t_0)})^b$$

Kita dapat mendefinisikan berat asimtotik (W_∞) sebagai berat teoretis yang sesuai dengan panjang asimtotik (L_∞). Jadi, $W_\infty = aL_\infty^b$. Dengan substitusi ini, kita mendapatkan bentuk akhir dari VBGF untuk berat:

$$W_t = W_\infty(1 - e^{-K(t-t_0)})^b$$

Interpretasi:

- W_t adalah berat ikan pada umur t .
- W_∞ adalah berat asimtotik teoretis.
- Parameter K dan t_0 persis sama dengan yang digunakan dalam model pertumbuhan panjang. Mereka adalah konstanta biologis yang menggambarkan laju pertumbuhan, terlepas dari apakah kita mengukurnya dalam satuan panjang atau berat.
- Eksponen b adalah parameter alometri dari hubungan panjang-bobot.

Bentuk kurva pertumbuhan berat biasanya lebih sigmoid daripada kurva pertumbuhan panjang. Pada awalnya, pertumbuhan berat lambat, kemudian mengalami fase akselerasi yang cepat (titik belok kurva), dan akhirnya melambat saat mendekati W_∞ . Titik belok ini, di mana laju penambahan biomassa adalah maksimum, sering kali menjadi perhatian dalam studi akuakultur, karena ini mungkin merupakan waktu yang paling efisien untuk memanen ikan.

Dengan kemampuan untuk memodelkan pertumbuhan baik dalam panjang maupun berat, kita sekarang memiliki perangkat lengkap untuk menggambarkan dinamika pertumbuhan individu. Informasi ini adalah fondasi yang akan kita gunakan dalam bab-bab selanjutnya untuk beralih dari pertumbuhan individu ke dinamika seluruh populasi, termasuk konsep mortalitas dan produktivitas stok.

Memahami apa yang dimakan oleh ikan adalah salah satu aspek paling fundamental dalam studi ekologi perikanan. Studi tentang kebiasaan makanan (*food habits*) atau biologi pakan (*feeding biology*) memberikan jendela langsung ke dalam peran ekologis suatu spesies dalam komunitasnya. Informasi ini tidak hanya penting untuk memahami biologi dasar suatu spesies, tetapi juga memiliki implikasi yang sangat luas dan praktis untuk pengelolaan perikanan, terutama dalam konteks pendekatan berbasis ekosistem.

Setiap populasi ikan adalah sebuah “mesin” yang mengubah energi dari tingkat trofik yang lebih rendah (misalnya, plankton, invertebrata) menjadi biomassa ikan. Dengan mempelajari apa, kapan, dan di mana ikan makan, kita dapat menjawab serangkaian pertanyaan ekologis yang krusial:

1. Posisi dalam Jaring Makanan: Apakah spesies ini herbivora, karnivora, atau omnivora? Apa tingkat trofiknya? Siapa saja mangsa utamanya?
2. Kompetisi Antar Spesies: Apakah ada tumpang tindih makanan (dietary overlap) yang signifikan antara spesies target dengan spesies lain, yang mengindikasikan adanya potensi kompetisi untuk sumber daya makanan yang terbatas?
3. Hubungan Predator-Mangsa: Spesies apa yang menjadi mangsa utama bagi ikan predator komersial? Sebaliknya, siapa predator utama dari ikan target kita, terutama pada tahap yuwana?
4. Variasi Ontogenetik dan Musiman: Apakah kebiasaan makanan berubah seiring dengan pertumbuhan ikan (pergeseran ontogenetik)? Apakah ada perubahan diet musiman yang terkait dengan ketersediaan mangsa atau siklus hidup ikan?

5. Kesehatan Ekosistem: Perubahan dalam diet suatu spesies dari waktu ke waktu dapat menjadi indikator perubahan dalam kelimpahan mangsa dan kesehatan ekosistem secara keseluruhan.

Informasi ini sangat vital untuk membangun model ekosistem yang realistis (seperti *Ecopath*) yang bertujuan untuk memprediksi dampak penangkapan satu spesies terhadap komponen lain dalam jaring makanan. Selain itu, pengetahuan tentang mangsa utama dapat membantu dalam memahami distribusi dan agregasi ikan, karena ikan sering kali akan berkumpul di area di mana mangsa mereka melimpah.

Bab ini akan membahas metodologi yang digunakan untuk menganalisis kebiasaan makanan ikan, dimulai dari teknik dasar pengambilan dan analisis isi saluran pencernaan. Selanjutnya, kita akan membahas berbagai indeks kuantitatif yang digunakan untuk meringkas data makanan dan menentukan tingkat kepentingan relatif dari setiap item mangsa. Terakhir, kita akan mengeksplorasi bagaimana informasi ini diintegrasikan untuk memahami tingkat trofik dan implikasinya bagi pengelolaan perikanan.

A. Metode Analisis Isi Lambung dan Usus

Studi tentang kebiasaan makanan ikan secara langsung bergantung pada analisis isi saluran pencernaan, terutama lambung (*stomach*) dan usus (*intestine*). Prinsipnya sederhana: "Anda adalah apa yang Anda makan". Dengan mengidentifikasi dan mengkuantifikasi organisme yang ditemukan di dalam lambung seekor ikan, kita dapat menyimpulkan makanannya dalam waktu dekat. Analisis isi usus juga dapat memberikan informasi, meskipun organisme di dalamnya biasanya sudah dalam tahap pencernaan yang lebih lanjut dan lebih sulit diidentifikasi.

Proses analisis isi lambung melibatkan serangkaian langkah yang sistematis, mulai dari pengambilan sampel di lapangan, pengawetan, analisis di laboratorium, hingga interpretasi data. Akurasi dan keandalan hasil sangat bergantung pada ketelitian yang dilakukan pada setiap tahapan.

1. Teknik Pengambilan Sampel dan Pengawetan Isi Saluran Pencernaan

a. Pengambilan Sampel di Lapangan

Kualitas hasil analisis kebiasaan makanan dimulai dari kualitas pengambilan sampel. Sampel ikan harus dikumpulkan dengan cara yang meminimalkan bias dan menjaga integritas isi lambung.

- 1) Waktu Pengambilan Sampel: Waktu makan ikan sangat bervariasi. Beberapa spesies aktif makan pada siang hari (diurnal), yang lain pada malam hari (nokturnal), atau saat fajar dan senja (krepuskular). Idealnya, pengambilan sampel harus dilakukan selama periode makan aktif spesies target, karena ini akan memaksimalkan kemungkinan untuk mendapatkan lambung yang berisi. Jika memungkinkan, pengambilan sampel selama 24 jam dapat memberikan gambaran lengkap tentang siklus makan harian.
- 2) Metode Penangkapan: Metode penangkapan ikan dapat mempengaruhi isi lambung. Alat tangkap aktif seperti pukat (*trawl*) dapat menyebabkan ikan memuntahkan isi lambungnya karena stres (regurgitasi) atau bahkan memakan organisme lain di dalam jaring (*net feeding*). Alat tangkap pasif seperti pancing (*hook and line*) atau jaring insang (*gill net*) sering kali memberikan hasil yang lebih baik, meskipun mungkin ada bias terhadap ikan yang sedang aktif mencari makan. Penting untuk mencatat metode penangkapan dan mempertimbangkan potensi biasnya.
- 3) Penanganan Sampel: Segera setelah ikan ditangkap, proses pencernaan harus dihentikan secepat mungkin untuk mencegah degradasi lebih lanjut dari item mangsa. Jika memungkinkan, seluruh ikan harus segera didinginkan di dalam es atau dibekukan. Jika tidak, prosedur yang paling umum adalah dengan segera melakukan pembedahan untuk mengeluarkan seluruh saluran pencernaan atau hanya lambungnya saja.

b. Pengawetan

Pengawetan yang tepat sangat krusial. Lambung atau saluran pencernaan yang telah dikeluarkan harus segera dimasukkan ke dalam

larutan pengawet. Larutan yang paling umum digunakan adalah formalin dengan konsentrasi 5% hingga 10%. Formalin adalah fiksatif yang sangat baik, yang dengan cepat menghentikan aktivitas enzimatik dan mengeraskan jaringan lunak dari organisme mangsa, sehingga membuatnya lebih mudah diidentifikasi di kemudian hari. Setelah beberapa hari atau minggu fiksasi dalam formalin, sampel dapat dipindahkan ke alkohol 70% untuk penyimpanan jangka panjang, karena paparan formalin yang terlalu lama dapat membuat struktur kalsium (seperti tulang atau cangkang) menjadi rapuh. Setiap wadah sampel harus diberi label yang jelas dan tahan air dengan informasi identifikasi yang lengkap (ID ikan, spesies, panjang, berat, tanggal, lokasi).

c. Analisis Laboratorium

Di laboratorium, setiap lambung dianalisis secara individual.

- 1) Pengukuran Awal: Lambung ditimbang (berat basah) dan tingkat kepenuhannya (*stomach fullness*) dinilai secara subjektif menggunakan skala (misalnya, 0 = kosong, 1 = 1/4 penuh, 2 = 1/2 penuh, 3 = 3/4 penuh, 4 = penuh). Tingkat pencernaan juga sering dicatat (misalnya, 1 = segar, 2 = sebagian tercerna, 3 = sangat tercerna).
- 2) Ekstraksi dan Identifikasi Mangsa: Isi lambung dikeluarkan dengan hati-hati ke dalam cawan petri yang berisi air atau alkohol. Menggunakan pinset dan jarum bedah di bawah mikroskop stereo, isi lambung disortir. Setiap item mangsa diidentifikasi hingga tingkat taksonomi serendah mungkin (misalnya, hingga tingkat famili, genus, atau spesies jika memungkinkan). Untuk mangsa yang sudah sangat tercerna, identifikasi mungkin hanya dapat dilakukan berdasarkan bagian-bagian keras yang tersisa, seperti otolit atau tulang ikan, paruh cumi-cumi, atau cangkang krustasea. Memiliki koleksi referensi dari organisme mangsa potensial di area studi sangat membantu dalam proses identifikasi.
- 3) Kuantifikasi Mangsa: Setelah diidentifikasi dan dipisahkan berdasarkan takson, setiap kategori mangsa harus dikuantifikasi. Ini adalah langkah kunci yang akan menjadi dasar untuk semua analisis kuantitatif selanjutnya. Ada tiga parameter dasar yang biasanya diukur untuk setiap kategori mangsa:

- (a) Jumlah (N): Jumlah total individu dari setiap kategori mangsa dihitung.
- (b) Volume (V): Volume total dari setiap kategori mangsa diukur. Ini dapat dilakukan dengan metode perpindahan air (*water displacement*) dalam gelas ukur kecil atau dengan menempatkan mangsa pada kertas milimeter dan memperkirakan volumenya.
- (c) Berat (W): Berat basah total dari setiap kategori mangsa ditimbang menggunakan timbangan analitik setelah dikeringkan permukaannya (*blotted wet weight*).

Pengumpulan data N, V, dan W ini akan memungkinkan perhitungan berbagai indeks ekologis yang digunakan untuk menggambarkan pentingnya setiap item makanan, yang akan kita bahas pada bagian selanjutnya.

2. Metode Frekuensi Kejadian, Volumetrik, Gravimetrik, dan Gabungan

Setelah data mentah (jumlah, volume, dan berat) dari setiap kategori mangsa terkumpul untuk sejumlah besar sampel lambung, langkah selanjutnya adalah meringkas data ini ke dalam metrik yang bermakna untuk menggambarkan diet populasi secara keseluruhan. Ada beberapa metode standar yang digunakan, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya sendiri (Hyslop, 1980). Menggunakan kombinasi beberapa metode biasanya memberikan gambaran yang paling komprehensif.

a. Metode Frekuensi Kejadian (*Frequency of Occurrence* - %F)

Metode ini adalah yang paling sederhana dan paling cepat. Ia hanya mencatat ada atau tidaknya suatu kategori mangsa dalam setiap lambung yang berisi makanan.

Perhitungan:

$$\%F_i = \frac{J_i}{J_{\text{total}}} \times 100$$

dimana:

- 1) %F_i adalah persentase frekuensi kejadian untuk item mangsa ke-i.
- 2) J_i adalah jumlah lambung yang mengandung item mangsa ke-i.

3) J_{total} adalah jumlah total lambung yang tidak kosong (berisi makanan) dalam sampel.

- Contoh: Jika dari 100 lambung yang berisi makanan, 60 di antaranya mengandung udang, maka %F untuk udang adalah $(60/100) \times 100 = 60\%$.
- Kelebihan: Cepat, mudah, dan tidak memerlukan identifikasi atau pengukuran detail. Berguna untuk memberikan gambaran kasar tentang spektrum makanan dan sering digunakan dalam studi awal.
- Kekurangan: Sangat tidak kuantitatif. Metode ini tidak membedakan antara lambung yang berisi satu ekor udang kecil dan lambung yang penuh dengan udang. Akibatnya, ia cenderung melebih-lebihkan pentingnya item mangsa yang kecil tetapi sering dimakan, dan meremehkan pentingnya item mangsa besar yang mungkin jarang dimakan tetapi menyumbang sebagian besar biomassa diet.

b. Metode Numerik atau Jumlah (*Numerical Method* - %N)

Metode ini didasarkan pada penghitungan jumlah individu dari setiap kategori mangsa.

Perhitungan:

$$\%N_i = \frac{N_i}{N_{total}} \times 100$$

dimana:

- 1) %N_i adalah persentase numerik untuk item mangsa ke-i.
 - 2) N_i adalah jumlah total individu item mangsa ke-i dari semua lambung.
 - 3) N_{total} adalah jumlah total individu semua item mangsa dari semua lambung.
- Contoh: Jika dalam seluruh sampel ditemukan total 500 individu mangsa, dan 200 di antaranya adalah kopepoda, maka %N untuk kopepoda adalah $(200/500) \times 100 = 40\%$.
 - Kelebihan: Memberikan estimasi kuantitatif dari jumlah mangsa yang dikonsumsi.

- Kekurangan: Sangat bias terhadap item mangsa yang kecil dan banyak jumlahnya (seperti plankton atau telur ikan). Metode ini dapat secara drastis meremehkan pentingnya satu ekor ikan besar yang dimangsa, yang mungkin setara secara energi dengan ribuan individu plankton. Selain itu, sulit diterapkan pada mangsa yang terfragmentasi atau yang tidak dapat dihitung sebagai individu (misalnya, alga filamen).

c. Metode Volumetrik (*Volumetric Method* - %V)

Metode ini mengukur volume yang ditempati oleh setiap kategori mangsa.

Perhitungan:

$$\%V_i = \frac{V_{total} V_i}{V_{total}} \times 100$$

dimana:

- 1) %Vi adalah persentase volumetrik untuk item mangsa ke-i.
- 2) Vi adalah volume total item mangsa ke-i dari semua lambung.
- 3) Vtotal adalah volume total semua item mangsa dari semua lambung.

- Kelebihan: Dianggap memberikan representasi yang lebih baik dari kontribusi nutrisi atau "bulk" dari setiap item mangsa dibandingkan dengan metode frekuensi atau numerik. Volume sering kali berkorelasi baik dengan kandungan energi.
- Kekurangan: Pengukuran volume bisa jadi sulit dan tidak presisi, terutama untuk item mangsa yang sangat kecil atau dalam jumlah sedikit. Kehadiran cairan atau lendir dapat mempengaruhi pengukuran.

d. Metode Gravimetri atau Berat (*Gravimetric Method* - %W)

Metode ini sangat mirip dengan metode volumetrik, tetapi menggunakan berat sebagai ukurannya.

Perhitungan:

$$\%W_i = \frac{W_{total} W_i}{W_{total}} \times 100$$

dimana:

- 1) %Wi adalah persentase gravimetrik untuk item mangsa ke-i.
- 2) Wi adalah berat total item mangsa ke-i dari semua lambung.

- 3) W_{total} adalah berat total semua item mangsa dari semua lambung.
- Kelebihan: Dianggap sebagai salah satu metode yang paling akurat untuk mengestimasi kontribusi energi dari setiap item mangsa, karena berat (terutama berat kering) berkorelasi paling baik dengan kandungan kalori. Pengukuran berat dengan timbangan analitik biasanya lebih presisi daripada pengukuran volume.
 - Kekurangan: Memakan waktu. Perbedaan dalam kandungan air antar item mangsa dapat menimbulkan bias jika menggunakan berat basah (misalnya, ubur-ubur memiliki berat basah tinggi tetapi nilai nutrisi rendah). Untuk akurasi tertinggi, berat kering (*dry weight*) lebih disukai, tetapi ini memerlukan proses pengeringan yang lama. Laju pencernaan yang berbeda juga dapat menjadi masalah; jaringan lunak akan kehilangan berat lebih cepat daripada bagian keras.

Kesimpulan Pemilihan Metode Tidak ada satu metode pun yang sempurna. Metode frekuensi kejadian baik untuk gambaran umum, metode numerik baik untuk pemakan plankton, sedangkan metode volumetrik dan gravimetri paling baik untuk mengestimasi pentingnya biomassa atau energi. Karena setiap metode memiliki bias yang berbeda, praktik terbaik yang sangat dianjurkan dalam studi kebiasaan makanan modern adalah dengan menggunakan beberapa metode secara bersamaan dan melaporkan hasilnya secara terpisah. Pendekatan ini memberikan gambaran yang jauh lebih seimbang dan memungkinkan pembaca untuk mengevaluasi data dari berbagai perspektif. Lebih baik lagi, nilai-nilai dari metode-metode ini dapat digabungkan ke dalam sebuah indeks gabungan, yang merupakan topik pada sub-bab berikutnya.

B. Indeks Pilihan Makanan (*Index of Preponderance*)

Seperti yang telah dibahas, setiap metode dasar untuk menganalisis isi lambung (%F, %N, %W, %V) memiliki bias dan keterbatasannya masing-masing. Metode frekuensi kejadian melebih-lebihkan pentingnya mangsa yang sering dimakan dalam jumlah kecil, sementara metode numerik melebih-lebihkan pentingnya mangsa kecil yang melimpah. Metode berat dan volume memberikan gambaran yang lebih baik tentang kontribusi biomassa, tetapi bisa jadi sulit untuk diukur secara akurat. Untuk mengatasi

keterbatasan ini dan memberikan satu ukuran tunggal yang lebih seimbang tentang pentingnya setiap item makanan, para ahli ekologi perikanan telah mengembangkan berbagai indeks gabungan (*composite indices*).

Indeks gabungan bekerja dengan mengintegrasikan informasi dari dua atau lebih metode dasar ke dalam satu nilai tunggal. Tujuannya adalah untuk menyeimbangkan kekuatan dan kelemahan dari masing-masing metode, sehingga menghasilkan peringkat kepentingan mangsa yang lebih kuat dan representatif. Dari berbagai indeks gabungan yang telah diusulkan, salah satu yang paling banyak digunakan dan paling diterima secara luas dalam literatur biologi perikanan adalah Indeks Pilihan Makanan atau *Index of Preponderance*, yang juga sering disebut sebagai *Index of Relative Importance* (IRI).

Konsep Dasar Indeks Gabungan

Ide di balik indeks gabungan adalah bahwa item makanan yang benar-benar penting bagi seekor ikan predator seharusnya tidak hanya muncul sesekali dalam jumlah besar, atau sering tetapi dalam jumlah sangat kecil. Sebaliknya, item makanan yang paling penting adalah yang sering dimakan (frekuensi tinggi) dan juga memberikan kontribusi substansial terhadap diet (jumlah, berat, atau volume yang signifikan). Dengan menggabungkan ukuran frekuensi dengan ukuran kuantitas (seperti berat atau jumlah), indeks gabungan memberikan bobot yang lebih tinggi pada item makanan yang memenuhi kedua kriteria tersebut.

Pendekatan ini membantu menghaluskan bias dari masing-masing metode. Misalnya, sebuah item mangsa yang memiliki %F sangat tinggi tetapi %W sangat rendah (misalnya, beberapa butir pasir yang tidak sengaja tertelan) akan mendapatkan nilai indeks gabungan yang rendah. Sebaliknya, item mangsa yang memiliki %W tinggi tetapi %F sangat rendah (misalnya, satu mangsa besar yang hanya ditemukan di satu dari seratus lambung) juga akan mendapatkan nilai yang relatif rendah. Item mangsa yang secara konsisten ditemukan di banyak lambung dan juga menyumbang sebagian besar dari berat total makanan akan muncul sebagai yang paling penting menurut indeks gabungan.

Index of Relative Importance (IRI) oleh Pinkas et al. (1971)

Indeks ini pertama kali diusulkan oleh Pinkas, Oliphant, dan Iverson pada tahun 1971 dan dengan cepat menjadi salah satu indeks yang paling populer. IRI secara spesifik menggabungkan tiga metode dasar: frekuensi kejadian (%F), numerik (%N), dan volumetrik (%V).

Perhitungan: Rumus asli untuk IRI adalah:

$$IRI_i = (\%N_i + \%V_i) \times \%F_i$$

dimana:

- 1) IRI_i adalah nilai Index of Relative Importance untuk item mangsa ke-i.
- 2) $\%N_i$ adalah persentase numerik untuk item mangsa ke-i.
- 3) $\%V_i$ adalah persentase volumetrik untuk item mangsa ke-i.
- 4) $\%F_i$ adalah persentase frekuensi kejadian untuk item mangsa ke-i.

Penjumlahan $\%N$ dan $\%V$ memberikan ukuran kuantitas, yang kemudian diberi bobot oleh frekuensi kejadiannya.

- Standardisasi menjadi Persentase (%IRI): Nilai IRI yang dihitung dari rumus di atas adalah nilai absolut yang tidak memiliki batas atas, sehingga sulit untuk membandingkan antar studi. Oleh karena itu, sangat umum untuk menstandarisasi nilai IRI menjadi persentase, yang sering disebut %IRI.

$$\%IRI_i = \frac{IRI_i}{\sum_{j=1}^n IRI_j} \times 100$$

dimana:

- 1) $\%IRI_i$ adalah persentase Index of Relative Importance untuk item mangsa ke-i.
- 2) $\sum_{j=1}^n IRI_j$ adalah jumlah total nilai IRI untuk semua (n) kategori mangsa.

Dengan standardisasi ini, jumlah total %IRI untuk semua item mangsa akan selalu sama dengan 100, membuatnya mudah untuk diinterpretasikan dan dibandingkan. Item mangsa dengan nilai %IRI tertinggi dianggap sebagai makanan yang paling penting bagi populasi ikan yang diteliti.

- Modifikasi IRI: Karena pengukuran volume (%V) sering kali sulit, banyak peneliti menggantinya dengan pengukuran berat (%W), yang sering dianggap lebih akurat. Modifikasi ini sangat umum dan diterima secara luas.

$$IRI(\text{modifikasi}) = (\%N_i + \%W_i) \times \%F_i$$

Beberapa peneliti bahkan menghilangkan komponen numerik (%N) sama sekali, terutama ketika berhadapan dengan mangsa yang terfragmentasi, dan hanya menggunakan berat atau volume:

$$IRI(\text{modifikasi}) = \%W_i \times \%F_i$$

Penting bagi peneliti untuk selalu menyatakan dengan jelas rumus mana yang mereka gunakan saat melaporkan hasil IRI.

Contoh Perhitungan dan Interpretasi IRI

Mari kita lihat contoh hipotetis untuk memahami bagaimana IRI bekerja dalam praktik. Misalkan kita menganalisis isi lambung dari populasi ikan kakap dan menemukan tiga kategori mangsa utama: Ikan kecil, Udang, dan Kepiting. Data yang kita kumpulkan adalah sebagai berikut:

Kategori Mangsa	%N	%W	%F
Ikan Kecil	20	60	50
Udang	70	30	80
Kepiting	10	10	30
Total	100	100	

Ekspor ke Spreadsheet

Sekarang, mari kita hitung IRI dan %IRI untuk setiap kategori mangsa menggunakan rumus modifikasi $IRI = (\%N + \%W) \times \%F$.

1. Ikan Kecil:

$$IRI = (20 + 60) \times 50 = 80 \times 50 = 4000$$

2. Udang:

$$IRI = (70 + 30) \times 80 = 100 \times 80 = 8000$$

3. Kepiting:

$$\text{IRI} = (10 + 10) \times 30 = 20 \times 30 = 600$$

$$\text{Total IRI} = 4000 + 8000 + 600 = 12600$$

Selanjutnya, kita standarisasi menjadi %IRI:

1. %IRI Ikan Kecil = $(4000 / 12600) \times 100 = 31.7\%$
2. %IRI Udang = $(8000 / 12600) \times 100 = 63.5\%$
3. %IRI Kepiting = $(600 / 12600) \times 100 = 4.8\%$

Interpretasi Hasil:

- a. Jika kita hanya melihat %N, kita mungkin akan menyimpulkan bahwa Udang (70%) adalah makanan terpenting, diikuti oleh Ikan kecil (20%).
- b. Jika kita hanya melihat %W, kita akan menyimpulkan bahwa Ikan kecil (60%) adalah makanan terpenting, diikuti oleh Udang (30%).
- c. Jika kita hanya melihat %F, kita akan menyimpulkan bahwa Udang (80%) adalah makanan terpenting, diikuti oleh Ikan kecil (50%).

Setiap metode memberikan peringkat yang sedikit berbeda. Namun, ketika kita melihat %IRI, gambaran yang lebih seimbang muncul. Udang muncul sebagai makanan yang paling dominan dengan %IRI = 63.5%. Ini karena udang tidak hanya sering dimakan (%F tinggi) tetapi juga memberikan kontribusi yang signifikan baik dari segi jumlah maupun berat. Ikan kecil adalah makanan terpenting kedua dengan %IRI = 31.7%. Meskipun kontribusi beratnya paling tinggi, frekuensi kejadiannya tidak setinggi udang. Kepiting, meskipun dimakan, jelas merupakan makanan sekunder atau insidental dengan %IRI hanya 4.8%, karena kontribusinya rendah di semua metrik.

Hasil %IRI ini sering kali disajikan secara visual dalam bentuk diagram lingkaran (*pie chart*) untuk menunjukkan kontribusi relatif dari setiap item makanan terhadap diet keseluruhan.

Indeks Pilihan Makanan (*Index of Preponderance*) oleh Natarajan dan Jhingran (1961)

Meskipun IRI adalah yang paling populer secara global, dalam beberapa literatur, terutama yang lebih tua atau dari wilayah tertentu, indeks lain

mungkin digunakan. Salah satunya adalah Indeks Pilihan Makanan (Index of Preponderance) yang diusulkan oleh Natarajan dan Jhingran (1961). Indeks ini secara konseptual mirip dengan IRI karena bertujuan untuk menggabungkan ukuran kuantitas dan frekuensi, tetapi menggunakan formulasi yang sedikit berbeda.

Perhitungan: Indeks ini secara spesifik menggabungkan metode volumetrik (%V) dan frekuensi kejadian (%F).

$$I_i = \sum_{j=1}^n (\%V_j \times \%F_j) \%V_i \times \%F_i \times 100$$

dimana:

- a. I_i adalah nilai Indeks Pilihan Makanan untuk item mangsa ke- i (sudah dalam bentuk persentase).
 - b. $\%V_i$ dan $\%F_i$ adalah persentase volumetrik dan frekuensi kejadian untuk item mangsa ke- i .
 - c. Penyebutnya adalah jumlah dari perkalian ($\%V \times \%F$) untuk semua (n) kategori mangsa, yang berfungsi sebagai faktor normalisasi.
- Perbandingan dengan IRI: Indeks ini secara matematis setara dengan versi modifikasi dari IRI di mana hanya satu ukuran kuantitas (volume atau berat) yang digunakan, yaitu $IRI_i = \%V_i \times \%F_i$, yang kemudian distandarisasi menjadi persentase. Ia memberikan bobot yang sama pada kontribusi volume dan frekuensi. Sama seperti IRI, $\%V$ dalam rumus ini sering kali diganti dengan $\%W$ (berat) karena alasan kepraktisan dan akurasi.

Kelebihan dan Kekurangan Indeks Gabungan

- **Kelebihan:**
 - a. Lebih Seimbang: Memberikan gambaran yang lebih holistik dan seimbang tentang pentingnya makanan dengan mengurangi bias dari masing-masing metode dasar.
 - b. Standardisasi: Memungkinkan perbandingan yang lebih mudah antar studi, lokasi, atau waktu, terutama ketika disajikan dalam bentuk persentase (%IRI).

c. Peringkat yang Jelas: Menghasilkan satu nilai tunggal yang dapat digunakan untuk membuat peringkat yang jelas dari item-item mangsa.

• **Kekurangan:**

a. Kehilangan Informasi: Dengan merangkum semuanya menjadi satu angka, beberapa nuansa dari data asli mungkin hilang. Inilah sebabnya mengapa sangat disarankan untuk selalu melaporkan nilai-nilai dasar (%F, %N, %W) di samping nilai indeks gabungan.

b. Bukan Ukuran Selektivitas: Penting untuk diingat bahwa IRI atau indeks serupa lainnya hanya menggambarkan apa yang dimakan oleh ikan (komposisi diet), bukan apa yang mereka pilih dari lingkungan. Suatu item mangsa mungkin memiliki %IRI yang tinggi hanya karena ia sangat melimpah di lingkungan, bukan karena ikan secara aktif memilihnya. Untuk mempelajari preferensi atau selektivitas makanan, data komposisi diet harus dibandingkan dengan data kelimpahan mangsa di lingkungan, yang melibatkan perhitungan indeks lain seperti Indeks Selektivitas Ivlev.

Secara keseluruhan, penggunaan indeks gabungan seperti IRI telah menjadi praktik standar dalam studi ekologi pakan. Ia menyediakan metode yang kuat dan diterima secara luas untuk meringkas data isi lambung yang kompleks menjadi kesimpulan yang jelas dan dapat ditindaklanjuti tentang makanan utama suatu populasi ikan.

C. Tingkat Trofik dan Hubungan Makanan di Ekosistem Perairan

Setelah kita mengidentifikasi dan mengkuantifikasi apa yang dimakan oleh suatu spesies ikan, kita dapat melangkah lebih jauh dari sekadar daftar mangsa. Kita dapat menempatkan spesies tersebut dalam konteks yang lebih luas dari struktur ekosistem perairan. Analisis kebiasaan makanan adalah kunci untuk memahami dua konsep ekologis fundamental: jaring-jaring makanan (*food webs*) dan tingkat trofik (*trophic levels*).

Jaring-Jaring Makanan (*Food Webs*)

Ekosistem bukanlah kumpulan spesies yang terisolasi; mereka adalah jaringan interaksi yang kompleks, dan salah satu interaksi yang paling

mendasar adalah “siapa makan siapa”. Jaringan-jaring makanan adalah representasi grafis dari hubungan makan-memakan ini. Ia menggambarkan aliran energi dan materi melalui suatu komunitas ekologis.

Dalam jaring makanan, organisme dikelompokkan ke dalam beberapa tingkatan dasar:

1. Produsen Primer (*Primary Producers*): Ini adalah dasar dari hampir semua jaring makanan. Mereka adalah organisme autotrof yang menghasilkan energi sendiri, biasanya melalui fotosintesis. Di ekosistem perairan, produsen primer utama adalah fitoplankton (alga mikroskopis), alga makro (rumput laut), dan tumbuhan air.
2. Konsumen Primer (*Primary Consumers*): Ini adalah herbivora yang memakan produsen primer. Di laut, konsumen primer utama adalah zooplankton (hewan mikroskopis seperti kopepoda dan krill) yang memakan fitoplankton, serta beberapa ikan herbivora yang memakan alga.
3. Konsumen Sekunder (*Secondary Consumers*): Ini adalah karnivora yang memakan konsumen primer (herbivora). Contohnya adalah ikan-ikan kecil (seperti sarden atau teri) yang memakan zooplankton.
4. Konsumen Tersier (*Tertiary Consumers*): Ini adalah karnivora yang memakan konsumen sekunder. Contohnya adalah ikan predator yang lebih besar (seperti tuna atau kerapu) yang memakan ikan-ikan yang lebih kecil.
5. Predator Puncak (*Apex Predators*): Ini adalah predator yang berada di puncak jaring makanan dan tidak memiliki predator alami yang signifikan di ekosistemnya (misalnya, hiu putih besar atau paus orca).
6. Dekomposer (*Decomposers*): Ini adalah bakteri dan jamur yang menguraikan bahan organik mati (detritus) dari semua tingkat trofik, mengembalikan nutrisi ke ekosistem untuk digunakan kembali oleh produsen primer.

Studi kebiasaan makanan memungkinkan kita untuk membangun diagram jaring makanan yang realistis untuk ekosistem tertentu. Dengan mengetahui bahwa spesies A memakan spesies B, dan spesies B memakan spesies C, kita dapat menggambar panah yang menunjukkan aliran energi

dari C ke B, dan dari B ke A. Memetakan jaring makanan ini sangat penting untuk memahami bagaimana dampak pada satu populasi (misalnya, penangkapan berlebih pada ikan sarden) dapat ber kaskad (cascade) dan mempengaruhi populasi lain yang bergantung padanya, baik predator maupun mangsanya.

Tingkat Trofik (*Trophic Level* - TL)

Konsep jaring-jaring makanan mengarah pada konsep kuantitatif yang sangat berguna yang disebut Tingkat Trofik (TL). Tingkat trofik adalah ukuran posisi suatu organisme dalam jaring makanan. Secara definisi, produsen primer (fitoplankton, alga) berada pada TL = 1. Herbivora yang memakan produsen primer berada pada TL = 2. Karnivora yang memakan herbivora berada pada TL = 3, dan seterusnya.

Namun, di alam, banyak ikan tidak memakan hanya satu jenis mangsa. Mereka adalah omnivora atau oportunistik, memakan berbagai organisme dari tingkat trofik yang berbeda. Untuk organisme semacam ini, tingkat trofik bukanlah bilangan bulat, melainkan nilai kontinu yang dapat dihitung berdasarkan proporsi setiap item mangsa dalam dietnya.

Rumus untuk menghitung tingkat trofik suatu spesies konsumen adalah (Odum & Heald, 1975):

$$TL_j = 1 + \sum_{i=1}^n (P_{ij} \times TL_i)$$

dimana:

1. TL_j adalah tingkat trofik dari spesies konsumen j (spesies yang kita teliti).
2. P_{ij} adalah proporsi (berdasarkan berat atau volume) dari item mangsa ke- i dalam diet spesies j .
3. TL_i adalah tingkat trofik dari item mangsa ke- i .
4. n adalah jumlah total item mangsa.

Contoh: Misalkan seekor ikan kakap (spesies j) memiliki diet yang terdiri dari:

1. 70% ikan sarden ($P_{1j}=0.7$), di mana sarden adalah pemakan zooplankton dan memiliki TL = 3.0.

2. 30% udang ($P_{2}=0.3$), di mana udang adalah pemakan detritus dan memiliki $TL = 2.0$.

Maka, tingkat trofik ikan kakap tersebut adalah: $TL_{kakap}=1+(P_{sardentimes}TL_{sarden})+(P_{udangtimes}TL_{udang})$
 $TL_{kakap}=1+(0.7times3.0)+(0.3times2.0)$ $TL_{kakap}=1+2.1+0.6=3.7$

Nilai $TL = 3.7$ menunjukkan bahwa ikan kakap ini adalah karnivora tingkat tinggi, yang sebagian besar memakan karnivora lain (konsumen sekunder) tetapi juga mengonsumsi sebagian kecil konsumen primer.

Estimasi tingkat trofik untuk spesies-spesies ikan komersial sangat penting. Perikanan global telah menunjukkan tren yang mengkhawatirkan yang dikenal sebagai "*fishing down the food web*" (Pauly et al., 1998). Fenomena ini menggambarkan bagaimana perikanan pada awalnya menargetkan ikan-ikan predator besar di puncak jaring makanan (TL tinggi, seperti tuna dan kod). Setelah stok-stok ini habis, perikanan kemudian beralih ke target yang lebih rendah dalam jaring makanan (TL lebih rendah, seperti ikan-ikan kecil pelagis dan invertebrata). Tren ini merupakan indikator kuat dari penangkapan berlebih yang serial dan degradasi ekosistem laut. Memantau perubahan rata-rata tingkat trofik dari hasil tangkapan dari waktu ke waktu dapat menjadi alat diagnostik yang kuat untuk menilai kesehatan perikanan dan ekosistem.

D. Implikasi Studi Kebiasaan Makanan dalam Pengelolaan

Studi tentang kebiasaan makanan ikan jauh dari sekadar latihan akademis. Ia memberikan informasi kritis yang memiliki implikasi langsung dan beragam bagi pengelolaan perikanan yang efektif dan berbasis ilmu pengetahuan. Mengabaikan ekologi pakan berarti mengelola sumber daya dengan pemahaman yang tidak lengkap tentang dinamika yang mengaturnya. Berikut adalah beberapa implikasi utama dari studi kebiasaan makanan.

1. Mendukung Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (EAFM) Ini adalah implikasi yang paling signifikan dalam paradigma pengelolaan modern. EAFM menuntut agar keputusan pengelolaan tidak hanya mempertimbangkan stok target secara terisolasi, tetapi

juga dampaknya terhadap dan dari ekosistem. Studi kebiasaan makanan adalah fondasi dari EAFM. Dengan memetakan jaring makanan, manajer dapat:

- a. Memprediksi Dampak Tidak Langsung: Memahami bagaimana penangkapan besar-besaran terhadap ikan pakan (seperti sarden) dapat berdampak negatif pada populasi predatornya (seperti tuna, mamalia laut, dan burung laut) yang bergantung padanya sebagai sumber makanan utama. Hal ini dapat mengarah pada penetapan kuota tangkap yang lebih konservatif untuk ikan pakan untuk memastikan "jatah" yang cukup bagi predator.
 - b. Mengelola Interaksi Kompetitif: Mengidentifikasi tumpang tindih makanan yang kuat antara spesies komersial yang berbeda. Jika dua spesies bersaing untuk sumber daya makanan yang sama, penangkapan berlebih pada satu spesies dapat secara tidak terduga mempengaruhi pertumbuhan dan kelimpahan spesies lainnya.
 - c. Memahami Dinamika Predator-Mangsa: Informasi diet sangat penting untuk model multispesies yang mencoba mengelola interaksi predator-mangsa secara eksplisit. Misalnya, dalam beberapa kasus, mengurangi populasi predator melalui penangkapan dapat meningkatkan kelangsungan hidup mangsanya, yang mungkin juga merupakan spesies komersial.
2. Memahami Variabilitas Pertumbuhan dan Kondisi Ikan Pertumbuhan dan kondisi ikan, seperti yang dibahas dalam bab sebelumnya, secara langsung bergantung pada ketersediaan dan kualitas makanan. Studi kebiasaan makanan membantu menjelaskan mengapa parameter-parameter ini bervariasi.
 - a. Jika laju pertumbuhan atau faktor kondisi suatu populasi menurun dari waktu ke waktu, analisis diet dapat mengungkapkan apakah ini disebabkan oleh pergeseran ke mangsa yang berkualitas lebih rendah atau penurunan umum dalam jumlah makanan yang dikonsumsi.
 - b. Perbandingan diet antara populasi di lokasi yang berbeda dapat menjelaskan mengapa satu populasi tumbuh lebih cepat atau mencapai ukuran yang lebih besar daripada yang lain.

3. Menjelaskan Distribusi dan Agregasi Ikan Ikan tidak tersebar secara acak di lautan; mereka sering kali berkumpul di area di mana sumber makanan mereka melimpah. Ini dikenal sebagai hotspot pakan.
 - a. Dengan mengetahui mangsa utama suatu spesies, kita dapat menggunakan informasi tentang distribusi mangsa tersebut (misalnya, dari survei akustik zooplankton) untuk memprediksi di mana ikan target kemungkinan besar akan ditemukan.
 - b. Informasi ini tidak hanya berguna bagi nelayan, tetapi juga bagi manajer untuk merancang survei ilmiah yang efisien dan untuk mengidentifikasi area-area pakan penting (*critical feeding habitats*) yang mungkin memerlukan perlindungan khusus.
4. Merancang Alat Tangkap yang Lebih Selektif dan Umpan yang Efektif Pengetahuan tentang preferensi makanan dan perilaku makan dapat digunakan dalam teknologi penangkapan.
 - a. Dalam perikanan pancing ulur (*longline*) atau pancing lainnya, pemilihan jenis umpan yang paling efektif sering kali didasarkan pada pengetahuan tentang mangsa alami dari spesies target.
 - b. Memahami perilaku makan juga dapat membantu dalam merancang alat tangkap yang mengurangi hasil tangkapan sampingan (*bycatch*).
5. Menginformasikan Pengembangan Akuakultur Untuk spesies yang dibudidayakan, studi tentang diet alaminya memberikan cetak biru untuk merumuskan pakan buatan yang paling sesuai dan bergizi. Meniru profil nutrisi dari mangsa alami dapat meningkatkan laju pertumbuhan, kesehatan, dan keberhasilan reproduksi ikan dalam sistem akuakultur.

Secara keseluruhan, studi kebiasaan makanan mengubah pandangan kita dari hanya melihat ikan sebagai "unit stok" menjadi melihatnya sebagai komponen yang hidup dan berinteraksi dalam ekosistem yang dinamis. Informasi ini sangat penting untuk beralih dari pengelolaan spesies tunggal yang reaktif menuju pendekatan yang lebih holistik, proaktif, dan berkelanjutan.

Ikan bukanlah organisme yang statis. Sebagian besar spesies melakukan pergerakan terarah dalam skala waktu dan ruang yang bervariasi, mulai dari pergerakan harian antara area makan dan berlindung hingga migrasi lintas samudra yang berlangsung selama berbulan-bulan. Pergerakan ini, yang secara kolektif dikenal sebagai ruaya atau migrasi, bukanlah pergerakan acak, melainkan respons terprogram terhadap kebutuhan biologis fundamental seperti mencari makan, bereproduksi, dan menghindari kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Di samping pergerakan individu, banyak spesies ikan juga menunjukkan tingkah laku sosial yang kompleks, terutama perilaku menggerombol (*schooling*), yang memiliki implikasi mendalam bagi kelangsungan hidup mereka dan cara mereka dieksploitasi oleh perikanan.

Memahami pola ruaya dan tingkah laku ikan adalah komponen penting lainnya dalam biologi perikanan. Informasi ini sangat krusial karena beberapa alasan:

1. Definisi Unit Stok: Pola ruaya adalah kunci untuk memahami konektivitas antar populasi. Apakah ikan di dua area yang berbeda merupakan bagian dari satu stok tunggal yang bermigrasi, atau apakah mereka dua stok terpisah? Jawaban ini menentukan skala geografis yang tepat untuk pengelolaan.
2. Kerentanan terhadap Penangkapan: Ikan sering kali paling rentan terhadap penangkapan ketika mereka berkumpul dalam kepadatan tinggi selama ruaya pemijahan atau di area makan. Memahami waktu dan lokasi agregasi ini sangat penting untuk mengelola upaya penangkapan.
3. Pengelolaan Lintas Batas: Banyak spesies ikan bernilai ekonomis tinggi (seperti tuna) melakukan ruaya melintasi batas-batas yurisdiksi nasional

(Zona Ekonomi Eksklusif) dan ke perairan internasional. Pengelolaan yang efektif untuk stok-stok ini memerlukan kerja sama internasional, yang harus didasarkan pada pemahaman yang solid tentang rute migrasi mereka.

4. Dampak Perubahan Lingkungan: Rute dan waktu ruaya sering kali sangat dipengaruhi oleh isyarat lingkungan seperti suhu dan arus laut. Perubahan iklim dapat mengganggu isyarat-isyarat ini, yang berpotensi menyebabkan ketidakcocokan (*mismatch*) antara waktu kedatangan ikan di area pemijahan dan puncak ketersediaan makanan untuk larvanya.

Bab ini akan membahas definisi dan berbagai jenis ruaya yang dilakukan oleh ikan, faktor-faktor lingkungan yang memicunya, serta mekanisme navigasi yang digunakan. Selanjutnya, kita akan mengkaji tingkah laku menggerombol dan implikasinya bagi ekologi ikan dan operasi perikanan.

A. Definisi, Pola, dan Jenis-jenis Ruaya

Secara formal, ruaya atau migrasi ikan didefinisikan sebagai pergerakan terarah dan periodik dari suatu populasi ikan dari satu habitat ke habitat lain. Kata kunci di sini adalah "terarah" dan "periodik". Ini membedakan ruaya sejati dari pergerakan acak atau penyebaran sederhana. Ruaya biasanya melibatkan pergerakan seluruh atau sebagian besar populasi dan sering kali terkait dengan tahapan spesifik dalam siklus hidup ikan.

Pola ruaya dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria, tetapi klasifikasi yang paling umum didasarkan pada jenis habitat perairan yang dilintasi. Berdasarkan kriteria ini, ruaya dapat dibagi menjadi tiga kategori utama: ruaya *diadromus*, *potamodromus*, dan *oseanodromus* (Myers, 1949).

1. Ruaya Diadromus: Anadromus, Katadromus, dan Amfidromus

Diadromi (dari bahasa Yunani, *dia* berarti "antara" dan *dromos* berarti "berlari") adalah istilah umum untuk ruaya yang terjadi antara air tawar dan air asin (laut). Ini adalah adaptasi yang luar biasa karena mengharuskan ikan untuk melakukan penyesuaian fisiologis yang signifikan untuk mengatasi

perubahan salinitas yang ekstrem (osmoregulasi). Ada tiga jenis utama ruaya diadromus:

a. Ruaya Anadromus (*Anadromy*)

- 1) Definisi: Ikan anadromus adalah ikan yang lahir dan menghabiskan tahap awal hidupnya di air tawar, kemudian bermigrasi ke laut untuk tumbuh menjadi dewasa (fase makan dan pertumbuhan), dan akhirnya kembali ke air tawar untuk bereproduksi (memijah).
- 2) Pola: Lahir di air tawar → Ruaya ke laut (tumbuh) → Kembali ke air tawar (memijah).
- 3) Contoh Klasik: Contoh paling terkenal dari ikan anadromus adalah berbagai spesies salmon Pasifik (*Oncorhynchus spp.*) dan salmon Atlantik (*Salmo salar*). Salmon menetas di hulu sungai berkerikil, menghabiskan beberapa bulan hingga beberapa tahun sebagai yuwana di sungai, kemudian bermigrasi ribuan kilometer ke lautan Pasifik Utara atau Atlantik Utara di mana mereka tumbuh dengan cepat dengan memakan sumber daya laut yang melimpah. Setelah mencapai kematangan seksual, mereka melakukan perjalanan pulang yang luar biasa, menggunakan indera penciuman yang tajam untuk menemukan kembali sungai kelahiran mereka dengan presisi yang menakutkan. Sebagian besar salmon Pasifik akan mati setelah memijah (*semelparous*), sementara beberapa salmon Atlantik dapat kembali ke laut dan memijah lagi di tahun-tahun berikutnya (*iteroparous*). Contoh lain termasuk ikan sturgeon dan beberapa spesies lamprey.
- 4) Dorongan Evolusioner: Strategi anadromi umumnya berevolusi di lintang yang lebih tinggi (daerah beriklim sedang dan sub-kutub). Di wilayah ini, lautan cenderung lebih produktif daripada sungai atau danau di daratannya. Dengan bermigrasi ke laut untuk makan, ikan dapat mengakses sumber makanan yang jauh lebih melimpah dan tumbuh menjadi jauh lebih besar daripada jika mereka tetap tinggal di air tawar. Ukuran tubuh yang lebih besar ini berkorelasi dengan fekunditas yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan keberhasilan reproduksi secara keseluruhan. Air tawar, meskipun

kurang produktif, menawarkan lingkungan yang relatif lebih aman dari predator bagi telur dan larva yang rentan.

b. Ruaya Katadromus (*Catadromy*)

- 1) Definisi: Ruaya katadromus adalah kebalikan dari anadromus. Ikan ini lahir di laut, kemudian bermigrasi ke air tawar untuk tumbuh menjadi dewasa, dan akhirnya kembali ke laut untuk bereproduksi.
- 2) Pola: Lahir di laut → Ruaya ke air tawar (tumbuh) → Kembali ke laut (memijah).
- 3) Contoh Klasik: Contoh paling ikonik adalah sidat air tawar dari genus *Anguilla*, seperti sidat Eropa (*Anguilla anguilla*) dan sidat Amerika (*Anguilla rostrata*). Kedua spesies ini memijah di lokasi yang sama di Laut Sargasso di Samudra Atlantik. Larva mereka yang transparan dan berbentuk seperti daun, disebut leptocephalus, akan melayang mengikuti arus Teluk selama berbulan-bulan hingga bertahun-tahun menuju pesisir Eropa atau Amerika Utara. Saat mendekati daratan, mereka bermetamorfosis menjadi "sidat kaca" (*glass eel*), memasuki muara dan sungai, dan berenang ke hulu. Mereka menghabiskan sebagian besar hidup mereka (bisa lebih dari 20 tahun) di sungai, danau, dan rawa sebagai "sidat kuning" (*yellow eel*). Ketika matang secara seksual, mereka mengalami transformasi lagi menjadi "sidat perak" (*silver eel*), dengan mata yang lebih besar dan warna yang lebih gelap, lalu memulai perjalanan kembali ke Laut Sargasso untuk memijah dan kemudian mati. Di Indonesia, berbagai spesies sidat tropis seperti *Anguilla bicolor* dan *Anguilla marmorata* juga menunjukkan pola katadromus.
- 4) Dorongan Evolusioner: Strategi katadromi cenderung lebih umum di daerah tropis dan subtropis. Di wilayah ini, perairan tawar (sungai, rawa) sering kali sangat produktif dan kaya akan makanan, sementara lautan tropis terbuka (di luar area terumbu karang atau *upwelling*) bisa jadi relatif miskin nutrisi (*oligotrofik*). Dengan bermigrasi ke air tawar untuk makan, ikan dapat memanfaatkan produktivitas daratan yang tinggi. Lautan, meskipun mungkin

kurang produktif untuk pakan, menyediakan lingkungan yang stabil dan luas untuk penyebaran larva.

c. Ruaya Amfidromus (*Amphidromy*)

- 1) Definisi: Ini adalah jenis ruaya diadromus yang paling tidak dipahami dengan baik dan sering disalahartikan. Pada ruaya amfidromus, migrasi antara air tawar dan air laut tidak bertujuan untuk pemijahan. Sebaliknya, pemijahan terjadi di air tawar, dan larva yang baru menetas akan segera hanyut ke laut atau muara untuk menjalani fase pertumbuhan awal (fase pelagis). Setelah mencapai ukuran tertentu sebagai yuwana, mereka kemudian bermigrasi kembali ke air tawar untuk tumbuh lebih lanjut menjadi dewasa dan menghabiskan sisa hidup mereka di sana, di mana mereka pada akhirnya akan bereproduksi.
- 2) Pola: Lahir di air tawar → Larva hanyut ke laut (pertumbuhan awal) → Yuwana kembali ke air tawar (pertumbuhan lanjutan dan tempat tinggal dewasa).
- 3) Contoh: Pola ini sangat umum pada banyak spesies ikan dan invertebrata di pulau-pulau samudra tropis, termasuk banyak spesies dari famili Gobiidae (ikan gobi) dan beberapa spesies udang. Di Indonesia, contoh yang baik adalah ikan-ikan dari genus *Sicyopterus* (ikan-ikan pemanjat air terjun). Mereka memijah di hulu sungai, larva hanyut ke laut, dan yuwana mereka yang kecil kemudian melakukan perjalanan pulang yang luar biasa, sering kali menggunakan sirip perut mereka yang termodifikasi menjadi cakram isap untuk memanjat air terjun dan mencapai habitat dewasa di hulu.
- 4) Dorongan Evolusioner: Tujuan utama dari fase pelagis di laut bagi larva amfidromus tampaknya adalah untuk penyebaran (dispersal). Ini memungkinkan spesies untuk mengkolonisasi sungai-sungai baru di pulau yang sama atau bahkan di pulau-pulau yang berbeda. Fase laut juga dapat menyediakan sumber makanan planktonik yang berbeda atau melimpah untuk larva. Migrasi kembali ke air tawar sebagai yuwana membawa mereka ke habitat yang mungkin

lebih aman dari predator laut dan menyediakan sumber daya yang cocok untuk pertumbuhan dewasa.

Implikasi Pengelolaan untuk Ikan Diadromus Ikan diadromus menghadapi ancaman ganda karena siklus hidup mereka bergantung pada konektivitas antara ekosistem air tawar, muara, dan laut. Pengelolaan yang efektif untuk spesies-spesies ini sangat menantang dan harus bersifat holistik. Ancaman utama meliputi:

- 1) Penghalang Migrasi: Pembangunan bendungan, bendung, dan penghalang lainnya di sungai dapat secara total memblokir rute migrasi ikan anadromus ke hulu (area pemijahan) dan ikan katadromus ke hilir (menuju laut). Pemasangan "tangga ikan" (*fish ladder*) atau jalan ikan lainnya dapat membantu, tetapi sering kali hanya efektif sebagian.
- 2) Degradasi Habitat: Kualitas habitat di kedua lingkungan sangat penting. Polusi, sedimentasi, atau kanalisasi sungai dapat merusak area pemijahan dan asuhan ikan anadromus. Sementara itu, degradasi habitat pesisir dan muara dapat merusak area transit dan pertumbuhan kritis bagi banyak spesies diadromus.
- 3) Penangkapan Berlebih: Ikan diadromus dapat ditangkap di berbagai titik dalam siklus hidup mereka—di sungai, di muara, dan di laut. Pengelolaan harus mengkoordinasikan upaya penangkapan di semua yurisdiksi ini untuk memastikan bahwa cukup banyak ikan dewasa yang dapat lolos untuk memijah (*escapement*).

Karena tantangan-tantangan ini, banyak populasi ikan diadromus di seluruh dunia, terutama salmon dan sidat, telah mengalami penurunan drastis dan sekarang menjadi fokus upaya konservasi dan restorasi yang intensif.

2. Ruaya Potamodromus dan Oseanodromus

Selain ruaya diadromus yang melintasi batas salinitas, ada juga ruaya signifikan yang terjadi sepenuhnya di dalam satu jenis lingkungan perairan:

baik seluruhnya di air tawar (*potamodromus*) atau seluruhnya di laut (*oseanodromus*).

a. Ruaya Potamodromus (*Potamodromy*)

- 1) Definisi: Ruaya potamodromus (dari bahasa Yunani, potamos berarti "sungai") adalah migrasi yang terjadi sepenuhnya di dalam perairan tawar. Ini bisa terjadi di dalam satu sistem sungai besar, antara sungai dan danau yang terhubung, atau di dalam danau besar.
- 2) Pola: Pola yang paling umum adalah migrasi dari area makan di bagian hilir sungai atau di danau, menuju ke area pemijahan yang lebih cocok di bagian hulu sungai. Setelah memijah, ikan dewasa mungkin akan kembali ke area makan, dan larva atau yuwana akan secara bertahap hanyut atau bermigrasi ke hilir menuju area asuhan dan pertumbuhan.
- 3) Contoh: Banyak spesies ikan di sistem sungai besar di seluruh dunia adalah potamodromus. Di sistem Sungai Amazon atau Mekong, ratusan spesies ikan melakukan migrasi musiman yang luar biasa, sering kali dipicu oleh siklus banjir tahunan (pulsa banjir). Di Indonesia, banyak spesies ikan air tawar ekonomis penting seperti ikan dari famili Cyprinidae (misalnya, beberapa jenis ikan mas, tawes) dan Pangasiidae (ikan patin) melakukan ruaya potamodromus. Mereka mungkin menghabiskan musim kemarau di badan utama sungai dan kemudian bermigrasi secara massal ke dataran banjir yang tergenang selama musim hujan untuk mencari makan dan memijah di antara vegetasi yang terendam.
- 4) Implikasi Pengelolaan: Sama seperti ikan anadromus, ikan potamodromus juga sangat terancam oleh fragmentasi sungai akibat pembangunan bendungan. Bendungan di sungai tropis besar dapat secara drastis mengganggu sinyal banjir musiman dan memblokir akses ke area pemijahan dan pakan yang kritis, yang berdampak buruk pada perikanan tangkap darat yang sering kali menjadi sandaran hidup jutaan orang.

b. Ruaya Oseanodromus (*Oceanodromy*)

- 1) Definisi: Ruaya oseanodromus (dari bahasa Yunani, *oceanos* berarti "samudra") adalah migrasi yang terjadi sepenuhnya di dalam lingkungan laut (air asin). Ini adalah jenis ruaya yang paling umum di antara ikan-ikan laut komersial.
- 2) Pola: Pola ruaya oseanodromus sangat bervariasi, tetapi biasanya mengikuti "segitiga migrasi" yang menghubungkan tiga area habitat kunci:
 - Area Pemijahan (*Spawning Grounds*): Lokasi di mana kondisi oseanografi (suhu, arus, produktivitas) optimal untuk kelangsungan hidup telur dan larva.
 - Area Asuhan (*Nursery Grounds*): Lokasi di mana yuwana dapat menemukan makanan yang melimpah dan perlindungan dari predator.
 - Area Pakan (*Feeding Grounds*): Lokasi di mana ikan dewasa dapat menemukan mangsa dalam jumlah besar untuk mendukung pertumbuhan dan pematangan gonad. Populasi ikan akan bermigrasi secara siklis di antara ketiga area ini.
- 3) Contoh: Sebagian besar ikan pelagis komersial yang paling penting di dunia adalah oseanodromus.
 - Tuna Sirip Biru Atlantik (*Thunnus thynnus*): Melakukan migrasi trans-atlantik yang epik. Mereka memijah di dua lokasi utama (Teluk Meksiko dan Laut Mediterania) dan kemudian bermigrasi ribuan kilometer melintasi Atlantik menuju area pakan yang kaya di lepas pantai Amerika Utara dan Eropa.
 - Ikan Kod Atlantik (*Gadus morhua*): Secara historis, melakukan migrasi musiman dari area pakan di perairan dingin Arktik ke area pemijahan yang sedikit lebih hangat di lepas pantai Norwegia atau Newfoundland.
 - Ikan Herring Laut Utara (*Clupea harengus*): Menunjukkan pola migrasi yang kompleks antara area pemijahan di dasar laut

berkerikil, area asuhan larva di perairan pesisir, dan area pakan dewasa di perairan terbuka Laut Utara.

- 4) Implikasi Pengelolaan: Karena ruaya oseanodromus sering kali mencakup jarak yang sangat jauh, banyak stok ikan ini bersifat lintas batas (transboundary) atau stok ikan yang bermigrasi jauh (*highly migratory stocks*). Mereka mungkin melintasi Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) beberapa negara serta perairan internasional (laut lepas). Pengelolaan yang efektif untuk stok-stok ini tidak dapat dilakukan oleh satu negara saja dan memerlukan pembentukan Organisasi Pengelolaan Perikanan Regional (*Regional Fisheries Management Organizations* - RFMOs), seperti Komisi Tuna Samudra Hindia (IOTC) atau Komisi Konservasi Tuna Sirip Biru Selatan (CCSBT). Organisasi-organisasi ini menyediakan forum bagi negara-negara anggota untuk secara kolektif menyetujui langkah-langkah pengelolaan seperti kuota tangkap dan peraturan teknis lainnya.

B. Faktor Pemicu dan Mekanisme Orientasi Ruaya

Ruaya ikan bukanlah peristiwa acak; ia adalah respons yang sangat terkoordinasi dan sering kali sangat tersinkronisasi dalam suatu populasi. Agar migrasi massal dapat terjadi, harus ada serangkaian faktor pemicu (*triggers*) yang memberi sinyal kepada ikan bahwa inilah saatnya untuk memulai perjalanan mereka. Selain itu, setelah perjalanan dimulai, ikan harus memiliki kemampuan untuk menavigasi dan menjaga arah yang benar menuju tujuan mereka, yang mungkin berjarak ribuan kilometer. Proses ini melibatkan interaksi yang kompleks antara kondisi fisiologis internal ikan dan isyarat-isyarat dari lingkungan eksternal.

Faktor-faktor yang mempengaruhi ruaya dapat dibagi menjadi dua kategori utama:

1. Faktor Ultimate (Penyebab Utama): Ini adalah alasan evolusioner mengapa ikan bermigrasi. Seperti yang telah dibahas, faktor ultimate biasanya adalah untuk meningkatkan keberhasilan hidup secara keseluruhan (*fitness*) dengan cara:

- a. Mengeksploitasi sumber daya yang terpisah secara spasial: Memanfaatkan area pakan yang kaya dan area pemijahan yang aman, meskipun keduanya berada di lokasi yang berbeda.
 - b. Menghindari kondisi yang tidak menguntungkan: Melarikan diri dari suhu ekstrem, kadar oksigen rendah, atau peningkatan tekanan predator.
 - c. Meningkatkan keberhasilan reproduksi: Memastikan telur dan larva dilepaskan di lokasi dan waktu di mana peluang mereka untuk bertahan hidup adalah yang tertinggi.
2. Faktor Proksimat (Pemicu Langsung): Ini adalah isyarat lingkungan atau fisiologis spesifik yang memberi tahu ikan kapan harus memulai migrasi. Faktor-faktor inilah yang akan kita fokuskan di sini, bersama dengan mekanisme orientasi yang digunakan selama migrasi.

Secara umum, dorongan untuk bermigrasi dikendalikan oleh ritme endogen (internal clock) yang kemudian disinkronkan atau dipicu oleh isyarat lingkungan eksternal. Kesiapan fisiologis, terutama yang berkaitan dengan status reproduksi (dikendalikan oleh hormon), adalah prasyarat internal yang penting. Seekor ikan tidak akan memulai migrasi pemijahan sampai gonadnya mencapai tahap perkembangan tertentu. Setelah siap secara fisiologis, ikan akan "menunggu" isyarat yang tepat dari lingkungan.

1. Peran Faktor Lingkungan (Suhu, Salinitas, Arus, Fotoperiode)

Ikan hidup dalam lingkungan sensorik yang kaya dan menggunakan berbagai isyarat dari lingkungan fisik dan kimia untuk memandu pergerakan mereka. Empat faktor lingkungan utama yang diketahui secara luas mempengaruhi waktu dan arah ruaya adalah suhu, salinitas, arus, dan fotoperiode.

a. Suhu

Suhu air adalah salah satu faktor lingkungan yang paling berpengaruh bagi ikan, karena sebagai hewan poikilotermik, suhu tubuh dan laju metabolisme mereka secara langsung ditentukan oleh suhu lingkungan.

- 1) Pemicu Migrasi: Perubahan suhu musiman sering kali menjadi pemicu utama untuk memulai migrasi. Banyak spesies ikan di

daerah beriklim sedang akan memulai migrasi pemijahan mereka ke arah kutub (perairan yang lebih dingin) atau ke perairan yang lebih dalam saat suhu meningkat di musim semi dan musim panas. Sebaliknya, mereka mungkin akan bermigrasi ke arah ekuator atau ke perairan yang lebih dalam untuk menghindari suhu dingin yang ekstrem di musim dingin.

- 2) Koridor Suhu: Banyak spesies, terutama ikan pelagis besar seperti tuna, sering kali melakukan migrasi di dalam "koridor" atau "jendela" suhu yang sempit. Mereka akan secara aktif mengikuti pergerakan massa air dengan suhu preferensi mereka. Peta suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature - SST*) yang diperoleh dari satelit sering kali dapat digunakan untuk memprediksi lokasi agregasi tuna, karena mereka sering ditemukan di sepanjang front termal (area di mana air hangat bertemu dengan air dingin), yang cenderung menjadi area yang sangat produktif.
- 3) Dampak Perubahan Iklim: Pemanasan global menyebabkan perubahan signifikan pada pola suhu laut. Hal ini telah terbukti menyebabkan pergeseran distribusi banyak spesies ikan ke arah kutub atau ke perairan yang lebih dalam untuk tetap berada dalam rentang suhu optimal mereka. Perubahan ini dapat mengganggu pola migrasi tradisional dan menciptakan ketidakcocokan dengan lokasi mangsa atau habitat pemijahan.

b. Salinitas

Salinitas, atau kadar garam dalam air, adalah faktor kritis terutama bagi ikan diadromus dan ikan yang hidup di muara.

- 1) Pemicu dan Penghalang: Gradien salinitas yang tajam di muara dapat berfungsi sebagai pemicu atau penghalang fisiologis. Ikan katadromus seperti sidat yang bermigrasi ke laut mungkin akan menunggu di muara sampai mereka sepenuhnya beraklimatisasi dengan air asin sebelum melanjutkan perjalanan. Demikian pula, ikan anadromus seperti salmon yang kembali ke air tawar harus melalui periode penyesuaian osmoregulasi di muara.

- 2) Mengikuti Massa Air: Di lautan terbuka, massa air yang berbeda sering kali dapat diidentifikasi berdasarkan tanda salinitasnya yang unik. Beberapa spesies ikan diketahui mengikuti massa air dengan salinitas tertentu selama migrasi mereka.

c. Arus Laut dan Sungai

Arus adalah fitur dominan di lingkungan perairan dan memainkan peran ganda dalam migrasi ikan: sebagai alat transportasi dan sebagai isyarat orientasi.

- 1) Transportasi Pasif: Pada tahap awal kehidupan, arus adalah mekanisme transportasi utama. Telur dan larva dari banyak spesies ikan laut (disebut ikhtioplankton) bersifat planktonik dan akan terbawa secara pasif oleh arus dari area pemijahan menuju area asuhan. Keberhasilan rekrutmen suatu populasi sering kali sangat bergantung pada apakah arus membawa larva ke habitat yang cocok atau tidak. Ini dikenal sebagai hipotesis "segitiga migrasi larva". Larva sidat (*leptocephalus*) yang melintasi Atlantik adalah contoh ekstrem dari transportasi pasif ini.
- 2) Migrasi Aktif: Ikan dewasa yang merupakan perenang kuat dapat menggunakan arus untuk keuntungan mereka. Mereka mungkin secara aktif berenang melawan arus (*rheotaxis positif*) untuk mencapai hulu sungai, atau berenang mengikuti arus untuk menghemat energi selama migrasi jarak jauh.
- 3) Isyarat Orientasi: Arah aliran air itu sendiri dapat memberikan isyarat arah yang penting. Di sungai, arah "hulu" dan "hilir" sudah jelas. Di lautan, ikan mungkin dapat mendeteksi arah arus yang dominan dan menggunakannya sebagai bagian dari "kompas" navigasi mereka.

d. Fotoperiode (Panjang Hari)

Fotoperiode, atau lamanya periode terang (siang hari) dalam siklus 24 jam, adalah isyarat lingkungan yang paling dapat diandalkan dan paling konsisten dari tahun ke tahun di lokasi geografis tertentu. Tidak seperti suhu atau arus yang dapat berfluktuasi, perubahan fotoperiode musiman sangat dapat diprediksi.

- 1) Sinkronisasi Ritme Endogen: Fotoperiode diyakini memainkan peran kunci sebagai Zeitgeber (pemberi waktu) utama yang menyinkronkan jam biologis internal ikan. Perubahan bertahap dalam panjang hari (misalnya, hari yang memanjang di musim semi) dideteksi oleh otak ikan (melalui mata atau langsung melalui tempurung kepala pada beberapa spesies) dan memicu kaskade respons hormonal.
- 2) Pemicu Pematangan Gonad dan Migrasi: Respons hormonal yang dipicu oleh fotoperiode ini sering kali merupakan sinyal awal yang memulai proses pematangan gonad. Ketika gonad mencapai tingkat perkembangan tertentu, dan dikombinasikan dengan pemicu lain seperti perubahan suhu, dorongan untuk memulai migrasi pemijahan akan muncul.
- 3) Migrasi Vertikal Harian: Fotoperiode juga mengontrol salah satu migrasi terbesar di planet ini: migrasi vertikal harian (diel vertical migration - DVM). Banyak organisme laut, mulai dari zooplankton hingga ikan-ikan di lapisan mesopelagik (zona remang-remang), akan bermigrasi dari perairan dalam menuju perairan permukaan pada malam hari untuk mencari makan, dan kemudian kembali ke kedalaman saat fajar untuk menghindari predator visual. Perubahan intensitas cahaya adalah pemicu utama untuk pergerakan massal ini.

Singkatnya, ikan tidak merespons hanya pada satu isyarat, melainkan mengintegrasikan informasi dari berbagai faktor lingkungan. Kombinasi dari kesiapan fisiologis internal yang disinkronkan oleh fotoperiode, dan dipicu oleh perubahan suhu atau arus yang tepat, menciptakan "jendela" waktu dan kondisi yang optimal untuk dimulainya ruaya.

2. Mekanisme Navigasi dan Orientasi Ikan

Setelah migrasi dimulai, tantangan berikutnya bagi seekor ikan adalah bagaimana cara menavigasi, sering kali melintasi ribuan kilometer perairan yang tampaknya tidak memiliki fitur, untuk mencapai tujuan yang spesifik. Kemampuan navigasi ikan adalah salah satu keajaiban dunia biologi dan melibatkan penggunaan serangkaian "kompas" dan "peta" sensorik yang

canggih. Meskipun pemahaman kita masih belum lengkap, penelitian telah mengidentifikasi beberapa mekanisme kunci.

a. Orientasi Matahari (*Sun Compass*)

Banyak hewan, termasuk ikan, dapat menggunakan posisi matahari di langit sebagai kompas untuk menjaga arah berenang yang konstan. Agar dapat berfungsi, kompas matahari ini harus dikombinasikan dengan jam biologis internal (*internal clock*) yang akurat. Karena posisi matahari berubah sepanjang hari, ikan harus mampu mengkompensasi pergerakan ini. Misalnya, untuk terus bergerak ke arah utara, ikan harus menjaga matahari di sisi kanannya pada pagi hari, tepat di depannya pada tengah hari (di belahan bumi utara), dan di sisi kirinya pada sore hari. Kemampuan ini telah ditunjukkan pada beberapa spesies ikan.

b. Orientasi Langit Terpolarisasi (*Polarized Light Compass*)

Bahkan ketika matahari tertutup awan, pola cahaya terpolarisasi di langit tetap ada dan dapat dideteksi oleh banyak ikan. Cahaya matahari menjadi terpolarisasi saat melewati atmosfer, dan pola polarisasi ini bergantung pada posisi matahari. Mata beberapa spesies ikan memiliki fotoreseptor khusus yang sensitif terhadap cahaya terpolarisasi, yang secara efektif memberi mereka kompas sekunder yang dapat berfungsi bahkan dalam kondisi mendung.

c. Orientasi Magnetik (*Magnetic Compass*)

Bumi dikelilingi oleh medan magnet dengan kutub utara dan selatan. Banyak hewan yang bermigrasi jarak jauh, termasuk burung, penyu, dan beberapa ikan seperti salmon dan tuna, diyakini memiliki kemampuan untuk mendeteksi medan magnet bumi dan menggunakannya untuk navigasi. Ini disebut *magnetoreception*. Mekanisme pastinya masih menjadi subjek penelitian intensif, tetapi ada dua hipotesis utama:

- 1) Berbasis Magnetit: Beberapa sel di dalam tubuh ikan (sering kali di area hidung) mengandung kristal-kristal kecil mineral magnetik yang disebut magnetit. Kristal-kristal ini diduga dapat berfungsi seperti jarum kompas mikro, berputar untuk menyelaraskan diri dengan garis medan magnet bumi dan memberikan informasi arah kepada sistem saraf.

- 2) Berbasis Kimia (*Radical-Pair Mechanism*): Hipotesis lain, yang awalnya dikembangkan untuk burung, menunjukkan bahwa reaksi kimia tertentu di dalam fotoreseptor di retina mata dapat dipengaruhi oleh medan magnet. Perubahan dalam reaksi ini dapat menciptakan pola visual yang bergantung pada arah medan magnet, yang secara efektif memungkinkan ikan untuk “melihat” garis-garis medan magnet.

Selain informasi arah (seperti kompas), medan magnet bumi juga dapat menyediakan informasi posisi (seperti “peta”). Intensitas dan sudut inklinasi (sudut antara garis medan magnet dan permukaan bumi) dari medan magnet bervariasi secara dapat diprediksi dengan lintang. Ikan mungkin dapat mendeteksi parameter-parameter ini untuk mendapatkan perkiraan kasar tentang posisi utara-selatan mereka.

d. Orientasi Kimia (*Chemical Cues / Olfaction*)

Indera penciuman (*olfaction*) memainkan peran yang sangat penting, terutama dalam fase akhir migrasi. Kasus yang paling terkenal adalah pada salmon anadromus. Hipotesis jejak bau (*olfactory imprinting*) menyatakan bahwa selama tahap awal kehidupan mereka di sungai kelahiran, salmon muda “mempelajari” dan “mengingat” profil kimia unik dari air sungai tersebut, yang merupakan campuran kompleks dari asam amino dari vegetasi dan tanah lokal. Ketika mereka kembali dari laut sebagai ikan dewasa bertahun-tahun kemudian, mereka menggunakan indera penciuman mereka yang sangat sensitif untuk mendeteksi jejak samar dari “bau” sungai kelahiran mereka di perairan pesisir. Mereka kemudian akan mengikuti gradien konsentrasi bau ini ke hulu, membuat pilihan yang benar di setiap percabangan sungai, sampai mereka tiba kembali di tempat mereka dilahirkan.

Kemampuan navigasi ikan kemungkinan besar tidak bergantung pada satu mekanisme tunggal, melainkan pada navigasi multi-modal. Ikan mengintegrasikan informasi dari berbagai sumber sensorik—matahari, cahaya terpolarisasi, medan magnet, dan bau—untuk membangun peta mental dari lingkungan mereka dan menentukan arah serta posisi mereka di dalamnya. Sistem yang redundan ini memberikan ketahanan; jika satu

isyarat tidak tersedia (misalnya, matahari tertutup awan tebal), isyarat lain (seperti medan magnet) masih dapat digunakan.

C. Tingkah Laku Menggerombol (*Schooling*) dan Implikasinya pada Perikanan

Selain pergerakan migrasi dalam skala besar, banyak spesies ikan menunjukkan tingkah laku sosial yang sangat terorganisir yang dikenal sebagai menggerombol. Perilaku ini adalah salah satu bentuk tingkah laku kolektif yang paling menakjubkan di dunia hewan. Meskipun istilah "gerombolan" sering digunakan secara umum, dalam biologi perikanan, penting untuk membedakan antara dua jenis utama dari agregasi sosial:

1. Shoaling: Ini adalah istilah yang lebih umum yang mengacu pada sekelompok ikan yang tetap bersama karena alasan sosial. Individu-individu dalam sebuah shoal mungkin tidak terorganisir dengan baik dan bisa terdiri dari berbagai ukuran atau bahkan spesies yang berbeda. Mereka hanya menikmati keuntungan berada dekat satu sama lain.
2. Schooling: Ini adalah bentuk shoaling yang jauh lebih terstruktur dan terpolarisasi. Sebuah school (gerombolan sejati) adalah kelompok ikan di mana semua individu umumnya berukuran sama, berenang ke arah yang sama, pada kecepatan yang sama, dan menjaga jarak yang konsisten satu sama lain. Gerakan mereka sangat tersinkronisasi, sering kali tampak seolah-olah mereka adalah satu organisme tunggal yang besar.

Perilaku menggerombol (*schooling*) sangat umum ditemukan pada ikan-ikan pelagis, baik pelagis kecil (seperti sarden, teri, kembung) maupun pelagis besar (seperti banyak spesies tuna dan tongkol). Diperkirakan sekitar 25% dari semua spesies ikan menunjukkan perilaku *shoaling* pada suatu tahap dalam hidup mereka, dan sekitar setengahnya membentuk *school* yang terpolarisasi.

Perilaku yang sangat terkoordinasi ini bukanlah kebetulan; ia adalah hasil dari adaptasi evolusioner yang memberikan serangkaian keuntungan signifikan bagi kelangsungan hidup individu di dalamnya. Keuntungan-keuntungan ini dapat dikategorikan ke dalam beberapa fungsi utama:

perlindungan dari predator, peningkatan efisiensi mencari makan, dan peningkatan keberhasilan reproduksi. Pemahaman tentang dinamika dan fungsi dari perilaku menggerombol ini tidak hanya penting secara ekologis, tetapi juga memiliki implikasi yang sangat mendalam bagi industri perikanan, karena perilaku inilah yang sering kali memungkinkan penangkapan ikan dalam jumlah besar secara efisien.

Keuntungan Fungsional dari Perilaku Menggerombol

Evolusi perilaku menggerombol yang kompleks didorong oleh keuntungan selektif yang kuat yang diberikannya kepada individu-individu dalam kelompok.

1. Perlindungan dari Predator (*Anti-predator Advantage*)

Ini dianggap sebagai keuntungan utama dan pendorong evolusi yang paling kuat untuk perilaku menggerombol. Berada dalam kelompok besar mengurangi risiko individu dimangsa melalui beberapa mekanisme:

- a. Efek Pengenceran (*Dilution Effect*): Ini adalah keuntungan statistik yang sederhana. Jika seekor predator hanya dapat menangkap satu mangsa pada satu waktu, maka peluang setiap individu untuk menjadi korban akan berkurang seiring dengan bertambahnya ukuran kelompok. Jika Anda adalah satu dari seribu ikan, peluang Anda untuk dimangsa jauh lebih kecil daripada jika Anda sendirian.
- b. Kebingungan Predator (*Confusion Effect*): Gerakan yang tersinkronisasi dari ratusan atau ribuan ikan yang berkilauan dapat membanjiri sistem pemrosesan visual predator. Predator mungkin akan kesulitan untuk fokus dan mengunci satu target individu dari massa yang bergerak serempak. Ketika diserang, gerombolan sering kali akan meledak ke segala arah atau membentuk "bola umpan" (*bait ball*) yang padat, yang semakin membingungkan predator.
- c. Peningkatan Deteksi Predator: Dengan banyak pasang mata dan gurat sisi yang waspada, sebuah gerombolan dapat mendeteksi predator yang mendekat dari jarak yang lebih jauh dan lebih cepat daripada yang bisa dilakukan oleh seekor ikan tunggal. Sinyal bahaya dapat dengan cepat menyebar ke seluruh kelompok, memungkinkan respons menghindar yang lebih cepat dan terkoordinasi.

- d. **Pertahanan Kelompok:** Dalam beberapa kasus, gerombolan dapat secara aktif menghalangi predator. Meskipun mungkin tidak menyerang balik, penampilan kolektif dari kelompok besar yang bergerak bersama dapat tampak mengintimidasi bagi beberapa predator, membuat mereka enggan untuk menyerang.

2. Peningkatan Efisiensi Mencari Makan (*Foraging Efficiency*)

Berada dalam kelompok juga dapat membantu ikan menemukan dan memanfaatkan sumber makanan dengan lebih efisien.

- a. **Pencarian yang Lebih Efektif:** Sebuah kelompok yang tersebar di area yang lebih luas memiliki peluang lebih besar untuk menemukan petak makanan (misalnya, konsentrasi plankton) daripada individu yang mencari sendirian. Begitu satu individu menemukan makanan, perilakunya yang berubah (misalnya, mulai makan) dapat menjadi isyarat bagi anggota kelompok lainnya untuk bergabung.
- b. **Penangkapan Mangsa yang Lebih Baik:** Untuk ikan karnivora, berburu dalam kelompok dapat memungkinkan mereka untuk menangkap mangsa yang lebih besar atau lebih lincah daripada yang bisa mereka tangani sendiri. Gerombolan tuna, misalnya, dapat bekerja sama untuk mengepung dan mengkonsentrasikan gerombolan ikan mangsa yang lebih kecil.

3. Efisiensi Hidrodinamik (*Hydrodynamic Efficiency*)

Ini adalah keuntungan yang lebih halus dan masih menjadi subjek penelitian. Ada hipotesis bahwa ikan yang berenang dalam formasi yang terstruktur dapat mengurangi biaya energi untuk berenang. Ikan yang berenang di belakang atau di samping ikan lain dapat memanfaatkan pusaran air (*vortices*) yang diciptakan oleh ikan di depannya untuk mengurangi hambatan (*drag*) dan menghemat energi. Meskipun sulit untuk dibuktikan secara definitif di alam liar, studi di laboratorium dan pemodelan komputer menunjukkan bahwa penghematan energi ini bisa jadi signifikan, terutama selama migrasi jarak jauh.

4. Peningkatan Keberhasilan Reproduksi

Perilaku menggerombol juga memainkan peran penting dalam reproduksi.

- a. Menemukan Pasangan: Berada dalam kelompok besar secara drastis meningkatkan peluang untuk menemukan pasangan yang siap memijah. Ini menghilangkan waktu dan energi yang seharusnya dihabiskan untuk mencari individu dari jenis kelamin yang berlawanan.
- b. Sinkronisasi Pemijahan: Interaksi sosial dan kimia di dalam agregasi pemijahan yang padat membantu menyinkronkan pelepasan gamet (telur dan sperma) antar individu. Sinkronisasi ini sangat penting untuk memaksimalkan peluang pembuahan, terutama bagi spesies yang melakukan pemijahan di perairan terbuka (*broadcast spawning*).

Implikasi Perilaku Menggerombol pada Perikanan

Sementara perilaku menggerombol memberikan keuntungan kelangsungan hidup yang besar bagi ikan dalam menghadapi predator alami, ironisnya, perilaku yang sama ini juga yang membuat mereka sangat rentan terhadap predator paling efisien di planet ini: manusia. Kemampuan banyak spesies ikan komersial untuk membentuk agregasi yang padat dan dapat diprediksi adalah landasan bagi banyak metode perikanan industri yang paling produktif di dunia.

1. **Peningkatan Efisiensi Penangkapan** Agregasi ikan mengubah sumber daya yang tadinya tersebar luas di lautan luas menjadi target yang terkonsentrasi dan layak secara ekonomi untuk dieksploitasi. Jauh lebih efisien bagi sebuah kapal penangkap ikan untuk menemukan satu gerombolan besar seberat 50 ton daripada harus mencari dan menangkap 50 ton ikan yang tersebar secara individual.

Perilaku menggerombol sangat penting bagi keberhasilan beberapa jenis alat tangkap utama:

- a. Pukat Cincin (*Purse Seine*): Ini adalah alat tangkap yang paling jelas memanfaatkan perilaku menggerombol. Kapal pukat cincin secara aktif mencari gerombolan ikan (sering kali dengan bantuan pencari ikan/sonar atau bahkan helikopter). Setelah gerombolan

ditemukan, jaring besar akan melingkarinya, dan bagian bawah jaring akan dikerutkan seperti tali tas serut, secara efektif menangkap seluruh atau sebagian besar gerombolan dalam satu kali operasi. Perikanan untuk tuna, sarden, teri, dan kembung di seluruh dunia sangat bergantung pada metode ini. Tanpa perilaku menggerombol, perikanan pukat cincin tidak akan ada.

- b. Pukat Tarik Pertengahan (Midwater Trawl): Alat tangkap ini digunakan untuk menargetkan agregasi ikan di kolom air. Kapal menggunakan sonar canggih untuk menemukan gerombolan ikan dan kemudian menarik jaring berbentuk corong yang besar melewati gerombolan tersebut.

2. Bias dalam Indikator Kelimpahan Kecenderungan ikan untuk menggerombol dapat menciptakan masalah serius dalam menafsirkan data perikanan, terutama data hasil tangkapan per unit upaya (*Catch Per Unit Effort* - CPUE). CPUE sering digunakan sebagai indeks kelimpahan relatif; idenya adalah bahwa ketika populasi menurun, akan lebih sulit untuk menangkap ikan, sehingga CPUE akan menurun. Namun, untuk spesies yang menggerombol, hubungan ini bisa jadi tidak berlaku. Ketika populasi total menurun, ikan yang tersisa mungkin tidak menyebar, tetapi justru membentuk lebih sedikit gerombolan dengan ukuran yang kurang lebih sama. Nelayan, dengan teknologi pencarian ikan yang canggih, akan terus dapat menemukan gerombolan-gerombolan ini dan mempertahankan tingkat CPUE yang tinggi. Akibatnya, CPUE bisa tetap stabil dan tinggi, memberikan ilusi bahwa populasi masih sehat, padahal kenyataannya biomassa total telah menurun secara drastis. Fenomena ini dikenal sebagai hiperstabilitas atau "efek gerombolan". Kegagalan untuk memperhitungkan efek ini dapat menyebabkan manajer tidak menyadari adanya masalah sampai populasi berada pada tingkat yang sangat rendah, sering kali setelah titik kritis terlampaui.

3. Penangkapan Terkait Agregasi (*Aggregation-based Fishing*)

Banyak perikanan secara eksplisit menargetkan agregasi ikan yang dapat diprediksi, baik yang terbentuk secara alami maupun buatan.

- a. Agregasi Pemijahan: Ikan sering kali bermigrasi ke lokasi dan waktu tertentu untuk membentuk agregasi pemijahan yang sangat padat. Agregasi ini sangat rentan terhadap penangkapan. Menargetkan agregasi pemijahan tidak hanya menghilangkan sejumlah besar ikan dewasa, tetapi juga secara langsung mengganggu proses reproduksi itu sendiri, yang dapat memiliki dampak yang sangat merusak pada rekrutmen di masa depan. Banyak kasus kolapsnya stok ikan karang, seperti beberapa spesies kerapu, disebabkan oleh penangkapan yang tidak diatur pada agregasi pemijahan mereka. Inilah sebabnya mengapa perlindungan terhadap agregasi pemijahan (misalnya, melalui penutupan musim dan/atau daerah) adalah salah satu alat manajemen yang paling penting.
- b. Rumpon (*Fish Aggregating Devices* - FADs): Perilaku ikan untuk berkumpul di sekitar objek yang mengapung di laut terbuka (disebut thigmotaksis) telah dieksploitasi secara ekstensif dalam perikanan tuna. Nelayan akan secara sengaja memasang rakit atau pelampung yang berlabuh atau hanyut, yang dikenal sebagai rumpon. Berbagai spesies ikan, terutama tuna cakalang dan tuna sirip kuning ukuran kecil, serta ikan-ikan lainnya, akan berkumpul di bawah rumpon ini. Kapal pukat cincin kemudian dapat dengan mudah menargetkan agregasi buatan ini. Meskipun sangat efisien, perikanan berbasis rumpon juga kontroversial karena cenderung menghasilkan tingkat *bycatch* (tangkapan sampingan) yang lebih tinggi untuk spesies non-target (seperti hiu, penyu, dan tuna ukuran yuwana) yang juga tertarik ke rumpon.

Kesimpulan Perilaku menggerombol adalah pedang bermata dua. Di satu sisi, ini adalah strategi bertahan hidup yang brilian yang telah memungkinkan banyak spesies ikan untuk berkembang di lautan yang penuh bahaya. Di sisi lain, strategi yang sama ini menjadi "tumit Achilles" mereka dalam menghadapi perikanan modern. Ia memungkinkan tingkat eksploitasi yang sangat tinggi dan dapat menutupi sinyal penurunan populasi. Oleh karena itu, seorang ahli biologi perikanan yang efektif harus memiliki pemahaman yang kuat tentang perilaku kolektif dari spesies yang mereka pelajari. Pengelolaan yang mengabaikan implikasi dari perilaku menggerombol berisiko membuat kesalahan besar dalam menilai status stok dan dalam melindungi populasi dari penangkapan berlebih.

Sejauh ini, kita telah membahas berbagai aspek biologi individu ikan—bagaimana mereka bereproduksi, tumbuh, makan, dan bergerak. Semua informasi ini adalah fondasi yang sangat penting. Namun, dalam pengelolaan perikanan, kita jarang sekali mengelola ikan sebagai individu. Unit fundamental dari analisis dan pengelolaan adalah entitas biologis pada tingkat yang lebih tinggi yang disebut stok atau populasi.

Konsep stok adalah salah satu ide paling sentral dan paling penting dalam seluruh ilmu perikanan. Hampir semua aspek penilaian dan pengelolaan perikanan—mulai dari pengumpulan data, pemodelan dinamika, hingga penerapan regulasi—bergantung pada asumsi yang kita buat tentang apa yang menjadi satu unit stok. Kesalahan dalam mendefinisikan batas-batas suatu stok dapat merusak semua analisis selanjutnya dan mengarah pada kegagalan pengelolaan yang parah, bahkan jika semua model matematika yang digunakan sudah benar.

Oleh karena itu, sebelum kita dapat membahas dinamika populasi dan penilaian stok, kita harus terlebih dahulu menjawab pertanyaan yang tampaknya sederhana tetapi sangat kompleks: "Apa itu stok?". Bab ini akan dikhususkan untuk mengeksplorasi konsep stok secara mendalam. Kita akan mendefinisikan apa yang dimaksud dengan unit stok, membahas mengapa identifikasi stok yang benar sangat penting untuk pengelolaan yang berkelanjutan, dan meninjau berbagai metode—mulai dari pendekatan klasik hingga teknik genetika molekuler modern—yang digunakan oleh para ilmuwan untuk mengidentifikasi dan membedakan antar stok ikan di alam. Terakhir, kita akan melihat bagaimana konsep ini diterapkan di Indonesia melalui sistem Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP-RI).

A. Konsep Stok atau Populasi dalam Perikanan

Dalam penggunaan umum, istilah “populasi” dan “stok” sering digunakan secara bergantian. Namun, dalam konteks biologi perikanan, mereka memiliki nuansa makna yang sedikit berbeda, meskipun saling terkait erat.

Secara ekologis, populasi didefinisikan sebagai sekelompok individu dari spesies yang sama yang hidup di wilayah geografis tertentu dan memiliki kemampuan untuk saling kawin (*interbreed*). Anggota dari populasi yang sama berbagi satu lungkang gen (*gene pool*) yang sama dan terisolasi secara reproduktif dari populasi lain dari spesies yang sama.

Istilah stok adalah istilah yang digunakan dalam perikanan yang dibangun di atas konsep populasi biologis, tetapi dengan fokus yang lebih terapan pada pengelolaan. Definisi stok yang paling sering dikutip adalah dari Gulland (1983), yang menyatakan bahwa stok adalah sekelompok individu dari suatu spesies yang dapat diperlakukan sebagai satu unit untuk tujuan penilaian dan pengelolaan. Definisi ini menyiratkan bahwa stok memiliki beberapa karakteristik utama:

1. Homogenitas Parameter: Individu dalam satu stok diasumsikan memiliki parameter laju pertumbuhan, laju mortalitas, dan laju rekrutmen yang serupa.
2. Kemandirian Demografis: Dinamika suatu stok (perubahan kelimpahannya) sebagian besar ditentukan oleh proses internalnya sendiri (pertumbuhan, rekrutmen, dan mortalitas) dan bukan oleh imigrasi dari atau emigrasi ke stok lain. Dengan kata lain, stok bersifat relatif “tertutup”.
3. Respons Unik terhadap Eksploitasi: Ketika tekanan penangkapan diterapkan pada satu stok, dampaknya (misalnya, penurunan biomassa) akan dirasakan di seluruh stok tersebut, tetapi tidak akan secara langsung mempengaruhi stok lain yang terpisah.

Idealnya, satu unit stok perikanan harus bertepatan dengan satu populasi biologis yang terisolasi secara reproduktif. Namun, dalam praktiknya, mendefinisikan batas-batas populasi yang sebenarnya bisa sangat sulit. Oleh karena itu, stok sering kali didefinisikan berdasarkan

kriteria praktis, seperti sekelompok ikan yang dieksploitasi oleh armada perikanan tertentu di area geografis tertentu, dengan asumsi bahwa kelompok ini cukup terisolasi untuk dikelola sebagai satu kesatuan.

Meskipun definisi praktis ini sering kali diperlukan, tujuan utama dari identifikasi stok (*stock identification*) adalah untuk memastikan bahwa unit pengelolaan yang kita gunakan (stok) sedekat mungkin dengan unit biologis yang sebenarnya (populasi). Kegagalan untuk melakukannya dapat menyebabkan masalah serius.

Mari kita pertimbangkan sebuah contoh sederhana. Bayangkan ada dua populasi ikan kakap yang terpisah: satu hidup di sekitar terumbu karang di Pesisir Barat Sumatera (Stok A), dan yang lainnya hidup di sekitar Kepulauan Mentawai (Stok B). Secara genetik, mereka tidak banyak bercampur. Stok A memiliki laju pertumbuhan yang lambat dan rekrutmen yang rendah, sedangkan Stok B tumbuh lebih cepat dan lebih produktif. Jika manajer perikanan secara keliru menganggap keduanya sebagai satu "Stok Kakap Pantai Barat Sumatera" yang besar dan menetapkan satu kuota tangkap total (*Total Allowable Catch* - TAC) untuk seluruh wilayah, bencana pengelolaan mungkin akan terjadi.

Armada perikanan, yang selalu berusaha memaksimalkan hasil tangkapan dengan biaya terendah, kemungkinan besar akan memfokuskan upaya mereka pada area yang paling produktif dan paling mudah diakses, yaitu Stok A. Akibatnya, Stok A akan mengalami tekanan penangkapan yang sangat berat dan mungkin akan habis terkuras (*depleted*). Sementara itu, Stok B mungkin hampir tidak tersentuh. Data pendaratan total untuk "Stok Kakap Pantai Barat Sumatera" mungkin terlihat stabil untuk sementara waktu (karena hasil tangkapan dari Stok B menutupi penurunan di Stok A), tetapi pada kenyataannya, salah satu komponennya telah mengalami penangkapan berlebih yang parah dan mungkin menuju kepunahan lokal. Inilah sebabnya mengapa identifikasi stok yang benar bukanlah masalah akademis, melainkan landasan dari pengelolaan perikanan yang bertanggung jawab.

Struktur stok di alam bisa sangat kompleks. Untuk satu spesies, kita mungkin menemukan:

1. Stok Tunggal (*Panmictic*): Seluruh spesies di suatu wilayah yang luas (misalnya, seluruh samudra) berfungsi sebagai satu populasi tunggal yang saling kawin secara acak. Ini relatif jarang terjadi.
2. Stok Diskrit (Terpisah): Spesies terdiri dari beberapa populasi yang jelas-jelas terpisah secara geografis dan/atau reproduktif, seperti contoh kakap di atas.
3. Struktur Metapopulasi: Terdiri dari serangkaian populasi lokal yang lebih kecil yang saling terhubung oleh tingkat pertukaran individu (migrasi) yang terbatas.
4. Isolasi oleh Jarak (*Isolation by Distance*): Tidak ada batas stok yang jelas, tetapi kemungkinan dua individu untuk saling kawin menurun secara kontinu seiring dengan bertambahnya jarak di antara mereka.

Tugas dari ahli biologi perikanan adalah untuk menyelidiki struktur populasi ini dan memberikan nasihat terbaik tentang bagaimana cara membagi sumber daya yang kompleks ini menjadi unit-unit pengelolaan yang masuk akal.

1. Pentingnya Memahami Unit Stok untuk Pengelolaan

Pentingnya konsep stok untuk pengelolaan perikanan yang efektif tidak dapat dilebih-lebihkan. Ia adalah asumsi fundamental yang mendasari hampir semua kerangka kerja penilaian stok. Seluruh model dinamika populasi, baik model produksi surplus maupun model berstruktur umur, beroperasi pada unit "stok". Model-model ini secara implisit mengasumsikan bahwa unit yang dimodelkan adalah unit biologis yang mandiri. Jika asumsi ini salah, maka semua output dari model—seperti estimasi Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari (MSY), biomassa saat ini, atau tingkat eksploitasi—akan menjadi bias dan berpotensi sangat menyesatkan.

Mengabaikan struktur stok yang sebenarnya dapat mengarah pada serangkaian konsekuensi negatif yang serius, baik bagi sumber daya ikan maupun bagi perikanan yang bergantung padanya.

- a. Risiko Penangkapan Berlebih Serial (*Serial Overfishing*) dan Kepunahan Lokal

Ini adalah risiko yang paling sering terjadi dan paling merusak, seperti yang diilustrasikan dalam contoh ikan kakap sebelumnya. Ketika beberapa

stok yang berbeda (dengan produktivitas yang berbeda) secara keliru dikelola sebagai satu stok tunggal yang besar, armada perikanan cenderung akan mengeksploitasi stok-stok tersebut secara berurutan, sebuah proses yang disebut penangkapan berlebih serial.

- 1) Tahap 1: Armada akan memfokuskan upaya pada stok yang paling dekat, paling padat, atau paling mudah ditangkap. Stok ini akan dieksploitasi secara intensif.
- 2) Tahap 2: Ketika stok pertama mulai menurun dan CPUE (hasil tangkapan per unit upaya) di sana menurun, armada akan beralih ke stok berikutnya yang sebelumnya kurang dieksploitasi.
- 3) Tahap 3: Proses ini berlanjut, dengan armada bergerak dari satu stok ke stok lainnya, menipiskan mereka satu per satu.

Masalahnya adalah, dari sudut pandang manajer yang hanya melihat data pendaratan total untuk seluruh wilayah, semuanya mungkin tampak baik-baik saja untuk waktu yang lama. Penurunan hasil tangkapan dari stok pertama yang habis akan ditutupi oleh peningkatan hasil tangkapan dari stok kedua yang baru dieksploitasi. CPUE keseluruhan mungkin tetap tinggi. Manajer mungkin tidak menyadari adanya masalah sampai stok terakhir mulai dieksploitasi dan hasil tangkapan total akhirnya mulai menurun drastis. Pada titik ini, beberapa komponen stok mungkin sudah berada pada tingkat yang sangat rendah atau bahkan punah secara lokal. Pemulihan dari kepunahan lokal ini bisa sangat lambat, atau bahkan tidak mungkin terjadi jika konektivitas dengan stok lain sangat rendah.

Kasus klasik dari masalah ini adalah runtuhnya perikanan ikan teri (*anchoveta*) di Peru pada awal 1970-an. Meskipun pada awalnya dianggap sebagai satu stok besar, penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa sebenarnya ada beberapa sub-populasi dengan dinamika yang berbeda. Pengelolaan yang menganggapnya sebagai satu unit tunggal berkontribusi pada penangkapan berlebih yang parah pada beberapa komponen stok utara yang lebih rentan.

2. Alokasi Upaya Penangkapan yang Tidak Tepat

Jika batas-batas stok tidak dipahami dengan benar, upaya pengelolaan untuk mengontrol upaya penangkapan dapat menjadi tidak efektif atau bahkan kontra-produktif. Misalkan manajer ingin mengurangi tekanan pada stok ikan kembung di Laut Jawa yang dinilai telah mengalami penangkapan berlebih. Jika mereka menerapkan pembatasan jumlah kapal di pelabuhan-pelabuhan utama di Pantai Utara Jawa, tetapi tidak menyadari bahwa sebagian besar dari stok yang sama juga dieksploitasi oleh armada dari Kalimantan Selatan yang mendaratkan ikannya di sana, maka pengurangan upaya di Jawa mungkin tidak akan banyak berpengaruh pada kesehatan stok secara keseluruhan. Tekanan penangkapan akan tetap tinggi karena upaya dari Kalimantan tidak dikontrol.

Sebaliknya, jika dua kelompok ikan di area yang berbeda sebenarnya adalah stok yang terpisah, tetapi dikelola sebagai satu kesatuan, maka pembatasan yang diterapkan secara seragam di kedua area mungkin tidak sesuai. Stok yang lebih produktif mungkin dapat menahan tingkat penangkapan yang lebih tinggi, sementara stok yang kurang produktif mungkin memerlukan perlindungan yang lebih ketat. Menerapkan satu aturan untuk semua dapat menyebabkan penangkapan yang kurang optimal (*underfishing*) di satu area dan penangkapan berlebih (*overfishing*) di area lain.

3. Kegagalan dalam Melindungi Keanekaragaman Genetik

Setiap stok atau populasi yang terisolasi secara reproduktif adalah unit evolusioner yang unik. Mereka memiliki lungkang gen (*gene pool*) yang berbeda yang telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan lokal mereka selama ribuan generasi. Keanekaragaman genetik antar stok ini (disebut juga keanekaragaman hayati intraspesifik) sangat penting untuk ketahanan jangka panjang suatu spesies secara keseluruhan.

- a. Adaptasi Lokal: Satu stok mungkin telah mengembangkan adaptasi genetik untuk tahan terhadap suhu yang lebih hangat, sementara stok lain mungkin lebih tahan terhadap penyakit tertentu.
- b. Efek Portofolio: Memiliki banyak stok yang berbeda dan independen menciptakan "efek portofolio", mirip dengan dalam investasi keuangan. Jika satu stok mengalami kegagalan rekrutmen karena kondisi

lingkungan lokal yang buruk, stok lain di tempat lain mungkin baik-baik saja. Keanekaragaman ini menstabilkan total produksi spesies dari waktu ke waktu.

Ketika kita salah mengelola dan menyebabkan kepunahan lokal pada salah satu stok, kita tidak hanya kehilangan biomassa ikan; kita secara permanen kehilangan keanekaragaman genetik unik yang dikandungnya. Ini mengurangi kemampuan spesies secara keseluruhan untuk beradaptasi dengan perubahan lingkungan di masa depan, seperti perubahan iklim. Melindungi struktur stok adalah sinonim dengan melindungi "portofolio" genetik dari suatu spesies.

4. Penilaian Status Stok yang Bias

Semua parameter biologis yang kita gunakan dalam model penilaian stok—laju pertumbuhan (K , L_∞), laju mortalitas alami (M), dan hubungan stok-rekrutmen—dapat bervariasi secara signifikan antar stok.

- a. Pencampuran Sampel: Jika seorang peneliti secara tidak sadar mengumpulkan sampel dari dua atau lebih stok yang berbeda dan menggabungkannya untuk analisis, parameter yang diestimasi akan menjadi nilai rata-rata yang aneh yang tidak mewakili salah satu stok dengan benar.
- b. Contoh Pertumbuhan: Bayangkan mencampurkan sampel dari stok A yang tumbuh lambat (K rendah, L_∞ besar) dengan stok B yang tumbuh cepat (K tinggi, L_∞ kecil). Kurva pertumbuhan *von Bertalanffy* yang dipasangkan pada data gabungan ini akan menghasilkan parameter K dan L_∞ perantara yang tidak akurat untuk kedua stok tersebut. Menggunakan parameter yang salah ini dalam model hasil per rekrut akan menghasilkan rekomendasi ukuran tangkap minimum yang salah.
- c. Contoh Rekrutmen: Hubungan stok-rekrutmen juga bisa sangat berbeda. Stok A mungkin memiliki rekrutmen yang stabil tetapi rendah, sedangkan Stok B mungkin memiliki rekrutmen yang sangat berfluktuasi tetapi kadang-kadang sangat tinggi. Menggabungkan data dari keduanya akan mengaburkan dinamika rekrutmen yang sebenarnya dan membuat prediksi menjadi tidak mungkin.

Singkatnya, mencampuradukkan data dari stok yang berbeda adalah seperti mencampur apel dan jeruk; hasil analisisnya tidak akan bermakna. Prinsip “sampah masuk, sampah keluar” (*garbage in, garbage out*) sangat berlaku di sini. Jika unit input (definisi stok) salah, maka output (nasihat pengelolaan) juga akan salah.

Kesimpulan Memahami struktur populasi dan mendefinisikan unit stok dengan benar bukanlah tugas yang mudah. Ia memerlukan pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan informasi dari berbagai sumber. Namun, upaya yang diinvestasikan dalam identifikasi stok sangatlah berharga. Ini adalah langkah pertama yang paling penting menuju pengelolaan perikanan yang rasional dan berkelanjutan. Tanpa pemahaman ini, kita berisiko mengelola “hantu”—rata-rata statistik yang tidak ada di alam—sambil secara tidak sadar menghancurkan unit-unit biologis nyata yang menopang perikanan kita. Bagian selanjutnya akan membahas berbagai alat dan teknik yang kita miliki untuk mengatasi tantangan identifikasi stok ini.

B. Metode Identifikasi Stok

Mengingat pentingnya mendefinisikan unit stok dengan benar, para ilmuwan perikanan telah mengembangkan serangkaian metode yang semakin canggih untuk menyelidiki struktur populasi ikan. Tidak ada satu metode tunggal yang dapat memberikan jawaban definitif. Sebaliknya, pendekatan terbaik adalah dengan menggunakan “kotak peralatan” (*toolbox*) yang berisi berbagai teknik yang berbeda. Jika beberapa metode independen yang berbeda semuanya menunjuk pada kesimpulan yang sama (misalnya, bahwa ikan di lokasi A dan B adalah stok yang terpisah), maka kita dapat memiliki keyakinan yang lebih besar pada kesimpulan tersebut. Pendekatan ini dikenal sebagai pendekatan holistik atau bukti yang saling menguatkan (*concordance of evidence*).

Metode-metode untuk identifikasi stok dapat secara luas dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama, berdasarkan jenis informasi yang mereka gunakan (Cadrin et al., 2005):

1. Analisis Parameter Sejarah Kehidupan: Membandingkan karakteristik biologis dasar seperti laju pertumbuhan, umur dan ukuran saat matang, serta waktu pemijahan antar area.
2. Analisis Data Meristik dan Morfometrik: Menggunakan perbedaan dalam bentuk tubuh dan jumlah bagian tubuh untuk membedakan antar kelompok.
3. Metode Penandaan (*Tagging*): Secara langsung mengamati pergerakan dan tingkat percampuran individu antar area.
4. Analisis Mikrokimia Struktur Keras: Menggunakan "tanda tangan" kimia alami yang terekam dalam otolit untuk menyimpulkan riwayat lingkungan dan asal-usul ikan.
5. Analisis Genetika Molekuler: Secara langsung memeriksa perbedaan pada tingkat DNA untuk mengukur aliran gen dan isolasi reproduktif antar kelompok.

Masing-masing pendekatan ini memberikan jenis wawasan yang berbeda tentang konektivitas dan diferensiasi populasi.

Analisis Parameter Sejarah Kehidupan (*Life History Parameters*) Ini adalah pendekatan yang paling klasik dan paling tidak langsung. Idenya adalah bahwa jika dua kelompok ikan benar-benar merupakan populasi yang terpisah dan hidup dalam kondisi lingkungan yang berbeda, mereka kemungkinan akan menunjukkan perbedaan yang konsisten dalam parameter biologis kunci mereka.

- a. Prosedur: Peneliti akan mengumpulkan sampel ikan dari beberapa lokasi geografis yang berbeda dan untuk setiap lokasi, mereka akan menganalisis:
 - Pertumbuhan: Mengestimasi parameter *von Bertalanffy* (L_{∞} dan K) untuk setiap kelompok.
 - Reproduksi: Menentukan ukuran dan umur rata-rata saat pertama kali matang gonad (L_m dan t_m) dan mengidentifikasi musim pemijahan (dari data IKG bulanan).
 - Fekunditas: Membandingkan hubungan fekunditas-panjang antar kelompok.

- b. Interpretasi: Jika perbedaan yang signifikan secara statistik ditemukan dalam satu atau lebih parameter ini antar lokasi (misalnya, ikan di lokasi A tumbuh lebih cepat dan matang lebih awal daripada di lokasi B), ini memberikan bukti tidak langsung bahwa mereka mungkin merupakan unit stok yang terpisah.
- c. Keterbatasan: Kelemahan utama dari metode ini adalah sulitnya memisahkan pengaruh genetik dari pengaruh lingkungan. Perbedaan dalam laju pertumbuhan bisa jadi hanya karena ikan di satu lokasi memiliki lebih banyak makanan (plastisitas fenotipik), bukan karena mereka secara genetik berbeda. Namun demikian, perbedaan yang stabil dari tahun ke tahun merupakan informasi penting bagi pengelolaan, terlepas dari penyebabnya, dan sering kali menjadi langkah pertama yang memicu penyelidikan lebih lanjut dengan metode lain.

1. Analisis Data Meristik dan Morfometrik

Pendekatan ini adalah salah satu metode paling klasik untuk identifikasi stok, yang didasarkan pada analisis bentuk tubuh. Seperti yang telah dibahas pada Bab 2, morfometrik adalah pengukuran dimensi tubuh (misalnya, panjang kepala, tinggi badan), sedangkan meristik adalah penghitungan bagian-bagian tubuh yang berseri (misalnya, jumlah jari-jari sirip, jumlah sisik pada gurat sisi).

Dasar Pemikiran Asumsi yang mendasari metode ini adalah bahwa kelompok ikan yang terisolasi satu sama lain akan mengalami kondisi lingkungan yang berbeda dan/atau memiliki latar belakang genetik yang sedikit berbeda. Kedua faktor ini dapat menyebabkan perbedaan yang halus namun konsisten dalam bentuk tubuh dan karakteristik meristik mereka.

- a. Pengaruh Lingkungan (Plastisitas Fenotipik): Karakter morfometrik (bentuk tubuh) sering kali bersifat plastis, artinya dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Ikan yang tumbuh di perairan berarus deras mungkin mengembangkan bentuk tubuh yang lebih ramping (streamlined) dibandingkan dengan ikan dari populasi yang sama yang hidup di perairan tenang. Suhu selama perkembangan awal juga dapat mempengaruhi jumlah bagian meristik seperti ruas tulang belakang.

- b. Pengaruh Genetik: Karakter meristik, khususnya jumlah ruas tulang belakang, cenderung lebih ditentukan oleh faktor genetik dan ditetapkan pada tahap perkembangan yang sangat awal. Oleh karena-sebab itu, perbedaan dalam hitungan meristik antar kelompok sering kali dianggap sebagai bukti yang lebih kuat untuk isolasi genetik jangka panjang.

Prosedur

- 1) Pengumpulan Sampel: Sampel ikan dikumpulkan dari semua lokasi yang dicurigai merupakan stok yang berbeda. Sangat penting untuk menstandarisasi rentang ukuran dan jenis kelamin ikan yang dianalisis untuk menghindari bias, karena bentuk tubuh dapat berubah seiring pertumbuhan (alometri) dan dapat berbeda antara jantan dan betina.
- 2) Pengukuran: Sejumlah besar karakter morfometrik dan meristik diukur atau dihitung untuk setiap individu dengan menggunakan prosedur yang sangat terstandarisasi untuk meminimalkan kesalahan pengukuran.
- 3) Analisis Statistik: Karena yang dianalisis adalah "bentuk" secara keseluruhan, yang merupakan kombinasi dari banyak variabel, maka analisis statistik multivariat sangat penting. Tujuannya adalah untuk menguji apakah ada perbedaan bentuk yang signifikan secara statistik antar kelompok dari lokasi yang berbeda.

Kelebihan:

- 1) Relatif Murah: Metode ini tidak memerlukan peralatan laboratorium yang sangat canggih dibandingkan dengan metode genetika atau mikrokimia.
- 2) Data Mudah Diperoleh: Pengukuran dapat dilakukan pada ikan yang dikumpulkan untuk tujuan studi lain (misalnya, studi reproduksi atau pertumbuhan).

Kekurangan:

- 1) Ambiguitas Genetik vs. Lingkungan: Sulit untuk memisahkan secara pasti apakah perbedaan yang diamati disebabkan oleh perbedaan genetik yang mendasarinya (menandakan stok yang benar-benar

terpisah) atau hanya respons sementara terhadap kondisi lingkungan yang berbeda.

- 2) Memerlukan Analisis Statistik yang Kuat: Interpretasi yang benar sangat bergantung pada penerapan teknik statistik multivariat yang tepat.

Meskipun memiliki keterbatasan, analisis morfometrik tetap menjadi alat penyaringan (*screening tool*) yang sangat berguna. Jika perbedaan morfologis yang signifikan ditemukan, ini memberikan alasan yang kuat untuk melakukan penyelidikan lebih lanjut dengan menggunakan metode yang lebih canggih dan mahal seperti genetika.

Teknik Statistik dalam Analisis Morfometrik

Untuk menganalisis data morfometrik dan statistik yang bersifat multivariat, beberapa teknik statistik digunakan untuk mengekstrak pola dan menguji hipotesis.

- a. Koreksi Alometri Langkah pertama yang penting sebelum analisis adalah menghilangkan pengaruh ukuran tubuh secara keseluruhan. Ikan yang lebih besar secara alami akan memiliki kepala yang lebih besar, sirip yang lebih panjang, dll. Jika efek ini tidak dihilangkan, analisis hanya akan memisahkan ikan berdasarkan ukurannya, bukan berdasarkan bentuknya. Koreksi alometri biasanya dilakukan dengan mengubah semua pengukuran morfometrik menjadi rasio terhadap panjang baku (*Standard Length*) atau dengan menggunakan metode regresi yang lebih canggih untuk menyesuaikan setiap pengukuran terhadap ukuran tubuh.
- b. Analisis Komponen Utama (*Principal Component Analysis - PCA*) PCA adalah teknik eksplorasi yang digunakan untuk mereduksi dimensionalitas data. Jika kita mengukur, katakanlah, 20 variabel morfometrik, PCA akan menciptakan variabel-variabel baru yang disebut Komponen Utama (*Principal Components - PC*). PC1 adalah sumbu yang menjelaskan variasi terbesar dalam data, PC2 menjelaskan variasi terbesar kedua yang tidak berkorelasi dengan PC1, dan seterusnya. Dengan memplot skor setiap ikan pada PC1 dan PC2, kita dapat secara visual melihat apakah individu-individu dari lokasi yang berbeda membentuk kelompok-kelompok (*clusters*) yang terpisah. PCA

tidak menguji signifikansi statistik, tetapi sangat baik untuk visualisasi pola awal.

- c. Analisis Fungsi Diskriminan (*Discriminant Function Analysis* - DFA)
DFA adalah teknik statistik inferensial yang secara eksplisit dirancang untuk menemukan kombinasi linier dari variabel-variabel (dalam hal ini, karakter morfometrik) yang paling baik dalam membedakan antara kelompok-kelompok yang telah ditentukan sebelumnya (misalnya, lokasi A vs. lokasi B vs. lokasi C). DFA akan menghasilkan "fungsi diskriminan" dan menguji apakah perbedaan rata-rata bentuk antar kelompok tersebut signifikan secara statistik (misalnya, menggunakan statistik Wilks' Lambda). DFA juga dapat digunakan untuk mengklasifikasikan individu yang tidak diketahui asalnya ke dalam kelompok yang paling mungkin berdasarkan morfologinya, dengan tingkat akurasi klasifikasi tertentu. Hasil DFA sering kali menjadi bukti inti dalam studi identifikasi stok berbasis morfologi.
- d. Analisis Varians Multivariat (*Multivariate Analysis of Variance* - MANOVA)
MANOVA adalah tes statistik lain yang dapat digunakan untuk menguji apakah ada perbedaan signifikan dalam vektor rata-rata dari beberapa variabel dependen (karakter morfometrik) di antara kelompok-kelompok yang berbeda. MANOVA menjawab pertanyaan: "Apakah ada perbedaan bentuk tubuh secara keseluruhan yang signifikan secara statistik antar lokasi?". Jika hasil MANOVA signifikan, analisis lanjutan seperti DFA dapat digunakan untuk menentukan variabel mana yang paling berkontribusi pada perbedaan tersebut.

Penggunaan yang tepat dari alat-alat statistik ini sangat penting untuk menarik kesimpulan yang valid dari data morfometrik dan meristik dalam studi identifikasi stok.

2. Penandaan (*Tagging*) dan Analisis Genetika Molekuler

Jika metode morfometrik memberikan bukti tidak langsung tentang pemisahan stok, maka metode penandaan dan genetika memberikan bukti yang jauh lebih langsung tentang pergerakan, percampuran, dan isolasi reproduktif.

a. Penandaan (*Tagging*)

Studi penandaan adalah metode yang paling intuitif untuk mempelajari pergerakan ikan. Prinsipnya sederhana: sejumlah ikan ditangkap, diberi tanda pengenal fisik, dan dilepaskan kembali ke lingkungan. Informasi tentang pergerakan, tingkat percampuran, pertumbuhan, dan bahkan mortalitas kemudian diperoleh ketika ikan-ikan yang bertanda ini ditangkap kembali oleh nelayan atau peneliti di kemudian hari.

Jenis-jenis Tanda (*Tags*): Terdapat berbagai jenis tanda yang digunakan, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangannya.

- 1) Tanda Eksternal Sederhana: Ini adalah jenis yang paling umum dan paling murah.
 - Tanda Jangkar (*Anchor Tag*) atau Tanda-T: Terdiri dari kepala nilon kecil yang "ditembakkan" dan mengait di antara tulang sirip punggung, dengan tabung plastik eksternal yang berisi nomor identifikasi dan informasi kontak. Sangat cepat untuk dipasang.
 - Tanda Dart (*Dart Tag*): Mirip dengan tanda jangkar tetapi dengan kepala logam atau plastik yang lebih besar.
 - Tanda Hidung (*Nose Tag*) atau Tanda Kancing (*Button Tag*): Melibatkan pemasangan cakram plastik di kedua sisi operkulum atau sirip punggung yang dihubungkan oleh pin. Keuntungan utama dari tanda eksternal adalah mereka terlihat jelas, sehingga meningkatkan kemungkinan dilaporkan oleh nelayan. Kelemahannya adalah mereka dapat terlepas (*tag shedding*), menyebabkan biofouling (ditumbuhi organisme lain), atau bahkan mempengaruhi perilaku dan kelangsungan hidup ikan.
- 2) Tanda Internal:
 - *Coded Wire Tag* (CWT): Ini adalah potongan kawat baja tahan karat yang sangat kecil (panjang sekitar 1 mm) yang diberi kode biner. Kawat ini disuntikkan ke dalam moncong atau jaringan lain dari ikan (biasanya pada tahap yuwana). Karena tidak terlihat dari luar, ikan yang ditandai dengan CWT biasanya juga diberi tanda sekunder, seperti pemotongan sirip adiposa, untuk menandakan

bahwa mereka memiliki tanda internal. Untuk membaca kodenya, ikan harus dibunuh dan kawatnya diekstraksi. Metode ini sangat berguna untuk studi skala besar pada ikan seperti salmon.

- *Passive Integrated Transponder (PIT) Tag*: Ini adalah kapsul kaca kecil yang berisi microchip dengan kode identifikasi unik dan antena. Ketika scanner khusus dilewatkan di dekat ikan, ia akan mengaktifkan chip dan menyiarkan kodenya. Keuntungan besarnya adalah setiap ikan memiliki ID unik dan tanda ini memiliki tingkat retensi yang sangat tinggi. Dapat digunakan pada ikan hidup berulang kali.
- 3) Tanda Elektronik (*Electronic Tags*): Ini adalah teknologi yang paling canggih dan paling mahal, tetapi memberikan data yang paling detail.
- Tanda Akustik (*Acoustic Tag*): Tanda ini secara berkala memancarkan sinyal suara (*ping*) dengan kode unik. Sinyal ini dapat dideteksi oleh penerima bawah air (*hidrofon*) yang ditempatkan secara strategis di sepanjang sungai, muara, atau perairan pesisir. Ini memungkinkan pelacakan pergerakan ikan secara kontinu saat mereka melewati "gerbang" pendengaran ini.
 - Tanda Satelit (*Pop-up Satellite Archival Tag - PSAT*): Tanda canggih ini dipasang secara eksternal pada ikan-ikan besar seperti tuna atau hiu. Tanda ini merekam data tentang kedalaman, suhu, dan intensitas cahaya selama periode waktu yang telah diprogram (misalnya, 6 bulan). Pada akhir periode, tanda akan secara otomatis terlepas dari ikan, mengapung ke permukaan, dan mengirimkan data yang telah disimpannya ke peneliti melalui sistem satelit Argos. Ini memungkinkan pelacakan pergerakan di lautan terbuka yang luas tanpa perlu menangkap kembali ikan tersebut.

Informasi yang Diperoleh dari Studi Penandaan

Studi penandaan yang dirancang dengan baik dapat memberikan informasi yang sangat berharga untuk identifikasi stok dan pengelolaan perikanan.

- 1) Pola Pergerakan dan Tingkat Percampuran: Ini adalah aplikasi utama untuk identifikasi stok. Dengan memetakan lokasi pelepasan dan lokasi penangkapan kembali, kita dapat secara langsung mengamati:
 - Tingkat Percampuran (*Mixing Rate*): Jika ikan yang ditandai dan dilepaskan di lokasi A secara konsisten hanya tertangkap kembali di sekitar lokasi A, dan ikan dari lokasi B hanya tertangkap kembali di lokasi B, ini memberikan bukti kuat bahwa mereka adalah dua stok yang terpisah dengan sedikit atau tanpa percampuran. Sebaliknya, jika ikan dari lokasi A sering tertangkap di lokasi B dan sebaliknya, ini menunjukkan bahwa mereka adalah bagian dari satu stok tunggal yang saling bercampur.
 - Rute dan Koridor Migrasi: Untuk ikan yang bermigrasi, penandaan dapat membantu memetakan rute migrasi musiman antara area pakan dan pemijahan.
 - Tingkat Keterikatan pada Habitat (*Site Fidelity*): Menunjukkan apakah ikan cenderung untuk tetap tinggal di atau kembali ke area tertentu (misalnya, terumbu karang tertentu).
- 2) Estimasi Parameter Pertumbuhan: Jika panjang ikan diukur pada saat penandaan dan pada saat penangkapan kembali, dan interval waktu di antara keduanya diketahui, ini memberikan pengukuran pertumbuhan individu yang sangat akurat. Data ini dapat digunakan untuk memvalidasi atau membangun kurva pertumbuhan *von Bertalanffy*.
- 3) Estimasi Laju Mortalitas: Dengan menggunakan model matematika yang lebih kompleks dan data tentang jumlah total ikan yang ditandai, jumlah yang dilaporkan kembali, dan upaya penangkapan total, studi penandaan dapat digunakan untuk mengestimasi laju mortalitas penangkapan (F) dan mortalitas total (Z).

Tantangan dan Pertimbangan dalam Studi Penandaan:

- 1) Biaya dan Tenaga: Studi penandaan, terutama yang menggunakan tanda elektronik, bisa sangat mahal dan membutuhkan banyak tenaga kerja.

- 2) Asumsi Kritis: Analisis data penandaan bergantung pada beberapa asumsi penting: (1) Tanda tidak mempengaruhi pertumbuhan atau kelangsungan hidup ikan; (2) Tanda tidak mudah terlepas; (3) Tingkat pelaporan dari ikan yang bertanda yang tertangkap kembali diketahui atau dapat diestimasi.
- 3) Kerja Sama Nelayan: Keberhasilan program penandaan konvensional sangat bergantung pada kerja sama dari nelayan komersial dan rekreasi untuk melaporkan penangkapan ikan bertanda. Kampanye publisitas dan program hadiah sering kali diperlukan.

Meskipun menantang, data langsung tentang pergerakan yang disediakan oleh studi penandaan sering kali merupakan bukti yang paling tidak ambigu dalam perdebatan tentang struktur stok.

b. Analisis Mikrokimia Struktur Keras

Metode ini relatif baru tetapi sangat kuat. Ia didasarkan pada prinsip bahwa struktur keras yang tumbuh secara bertahap, seperti otolit, merekam "tanda tangan" kimia dari lingkungan perairan tempat ikan hidup. Saat otolit tumbuh dengan menambahkan lapisan kalsium karbonat, ia juga memasukkan sejumlah kecil elemen lain (elemen jejak atau *trace elements*) dari air di sekitarnya ke dalam matriks kristalnya. Komposisi kimia dari air (terutama rasio elemen jejak) dapat bervariasi secara geografis. Akibatnya, otolit menjadi arsip kronologis alami dari riwayat lingkungan yang dialami oleh seekor ikan.

Prinsip Dasar Otolith Microchemistry

- 1) Otolit sebagai Perekam Lingkungan: Komposisi elemen jejak dalam setiap lapisan pertumbuhan otolit mencerminkan komposisi kimia air pada saat lapisan itu terbentuk.
- 2) Tanda Tangan Geografis: Jika massa air di lokasi A memiliki tanda tangan kimia (misalnya, rasio Stronsium terhadap Kalsium, Sr/Ca) yang berbeda dari massa air di lokasi B, maka ikan yang menghabiskan hidupnya di lokasi A akan memiliki tanda tangan kimia otolit yang berbeda dari ikan yang hidup di lokasi B.
- 3) Tidak Dipengaruhi Fisiologi: Tingkat penggabungan banyak elemen jejak ke dalam otolit sebagian besar ditentukan oleh konsentrasinya

di air dan tidak terlalu dipengaruhi oleh kondisi fisiologis ikan. Ini menjadikannya penanda lingkungan yang andal.

Prosedur Analisis

- 1) Pengambilan Sampel: Otolit diekstraksi dari ikan yang dikumpulkan dari berbagai area yang ingin dibandingkan.
- 2) Persiapan: Otolit dibersihkan secara menyeluruh dan biasanya dipotong menjadi irisan tipis melintang untuk mengekspos semua lapisan pertumbuhan dari inti hingga tepi.
- 3) Analisis Kimia: Komposisi kimia dari otolit dianalisis menggunakan teknologi canggih. Metode yang paling umum adalah *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS). Dalam metode ini, laser yang sangat presisi akan mengikis (ablasi) sejumlah kecil material dari titik-titik tertentu di sepanjang sumbu pertumbuhan otolit (misalnya, dari inti, dari setiap annulus, atau dari tepi). Material yang terkikis ini kemudian dimasukkan ke dalam spektrometer massa plasma, yang dapat mengukur konsentrasi berbagai elemen (misalnya, Sr, Ba, Mg, Mn, Pb) dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.

Aplikasi dalam Identifikasi Stok

- 1) Membedakan Kelompok Asal (*Nursery Grounds*): Dengan menganalisis komposisi kimia dari inti otolit (yang terbentuk selama tahap larva dan yuwana awal), para ilmuwan dapat menentukan apakah ikan dewasa yang ditangkap di area makan campuran berasal dari area asuhan yang berbeda. Jika ditemukan beberapa kelompok ikan dengan tanda tangan kimia inti yang berbeda, ini adalah bukti kuat bahwa mereka berasal dari stok atau kontingen pembibitan yang terpisah.
- 2) Melacak Riwayat Migrasi: Dengan menganalisis komposisi kimia di sepanjang transek dari inti ke tepi otolit, riwayat pergerakan individu ikan antar lingkungan yang berbeda secara kimia dapat direkonstruksi. Misalnya, rasio Sr/Ca dalam otolit sangat sensitif terhadap salinitas. Pada ikan diadromus, pergerakan dari air tawar (Sr/Ca rendah) ke air laut (Sr/Ca tinggi) akan meninggalkan jejak yang sangat jelas pada otolit, yang memungkinkan validasi pola migrasi anadromus atau katadromus.

Analisis mikrokimia otolit adalah alat yang sangat ampuh karena ia menyediakan penanda alami (*natural tag*) yang dibawa oleh setiap ikan sepanjang hidupnya, yang merekam informasi tentang asal-usul dan pergerakannya tanpa perlu menangkap dan menandai ikan tersebut secara fisik.

c. Analisis Genetika Molekuler

Ini adalah pendekatan yang paling langsung untuk menjawab pertanyaan tentang isolasi reproduktif dan aliran gen (*gene flow*), yang merupakan inti dari konsep populasi biologis. Genetika molekuler menggunakan variasi pada tingkat DNA untuk menyimpulkan tingkat keterkaitan dan percampuran antara kelompok-kelompok ikan.

Dasar Pemikiran

- 1) Aliran Gen dan Diferensiasi: Jika dua kelompok ikan secara teratur saling kawin (aliran gen tinggi), maka frekuensi alel (varian gen) di antara kedua kelompok tersebut akan cenderung homogen atau sangat mirip. Sebaliknya, jika mereka terisolasi secara reproduktif (aliran gen rendah atau tidak ada), maka proses-proses seperti mutasi acak, hanyutan genetik (*genetic drift*), dan seleksi alam yang bekerja secara independen di setiap kelompok akan menyebabkan frekuensi alel mereka menjadi berbeda dari waktu ke waktu. Ini disebut diferensiasi genetik.
- 2) Mengukur Diferensiasi: Dengan menganalisis DNA dari sampel individu dari lokasi yang berbeda, ahli genetika populasi dapat mengukur tingkat diferensiasi genetik ini. Tingkat diferensiasi genetik yang tinggi dan signifikan secara statistik antara dua kelompok adalah bukti kuat bahwa mereka merupakan stok atau populasi yang terpisah secara reproduktif.

Penanda Genetik (*Genetic Markers*) Para ilmuwan tidak melihat seluruh genom, melainkan berfokus pada bagian-bagian spesifik dari DNA yang dikenal sebagai penanda genetik. Penanda yang baik adalah yang menunjukkan tingkat variasi (*polimorfisme*) yang cukup tinggi untuk dapat mendeteksi perbedaan antar populasi. Beberapa penanda yang umum digunakan meliputi:

- 1) DNA Mitokondria (mtDNA): Mitokondria adalah organel di dalam sel yang memiliki DNA-nya sendiri. mtDNA memiliki beberapa keunggulan: ia hanya diwariskan dari ibu (maternal), tidak mengalami rekombinasi, dan memiliki laju mutasi yang relatif lebih tinggi daripada DNA inti. Ini membuatnya sangat berguna untuk mempelajari sejarah populasi dan hubungan filogenetik. Bagian dari mtDNA yang sering dianalisis adalah D-loop (*control region*) atau gen sitokrom oksidase I (COI, digunakan untuk DNA barcoding).
- 2) Mikrosatelit (*Microsatellites*) atau *Short Tandem Repeats* (STRs): Ini adalah urutan DNA pendek (misalnya, 'CA') yang diulang berkali-kali secara berurutan (misalnya, CACACACACA...). Jumlah pengulangan ini bisa sangat bervariasi antar individu, menjadikannya penanda yang sangat polimorfik dan sangat kuat untuk mendeteksi struktur populasi yang halus dan baru terjadi.
- 3) Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs): Ini adalah variasi pada satu posisi basa tunggal dalam urutan DNA. Dengan kemajuan teknologi sekuensing generasi baru (*Next-Generation Sequencing*), sekarang mungkin untuk menganalisis ribuan SNP di seluruh genom. Ini memberikan kekuatan statistik yang luar biasa untuk mendeteksi bahkan tingkat diferensiasi genetik yang sangat rendah dan untuk mengidentifikasi gen-gen spesifik yang mungkin berada di bawah tekanan seleksi alam yang berbeda antar lingkungan.

Analisis Statistik Genetik Data genetik dianalisis menggunakan kerangka kerja statistik populasi yang kuat. Ukuran diferensiasi yang paling umum adalah F_{ST} (atau analognya seperti Φ_{ST}). F_{ST} adalah indeks yang mengukur proporsi variasi genetik total yang disebabkan oleh perbedaan frekuensi alel antar sub-populasi. Nilai F_{ST} berkisar dari 0 hingga 1.

- 1) $F_{ST} = 0$: Menunjukkan tidak ada diferensiasi genetik; semua kelompok berbagi satu lungkang gen yang sama (*panmictic*).
- 2) $F_{ST} > 0$: Menunjukkan adanya diferensiasi. Semakin tinggi nilai F_{ST} , semakin besar perbedaan genetik antar kelompok dan semakin rendah tingkat aliran gen di antara mereka.

Tes statistik (seperti exact test atau AMOVA - Analysis of Molecular Variance) digunakan untuk menentukan apakah nilai FST yang diamati secara signifikan lebih besar dari nol.

Kesimpulan: Genetika molekuler adalah alat yang sangat kuat karena secara langsung menguji premis dasar dari isolasi reproduktif. Jika perbedaan genetik yang signifikan ditemukan, ini adalah bukti yang sangat meyakinkan tentang adanya stok yang terpisah. Namun, ketiadaan perbedaan genetik yang terdeteksi tidak selalu berarti hanya ada satu stok. Aliran gen dalam jumlah yang sangat sedikit (misalnya, beberapa migran per generasi) mungkin sudah cukup untuk menjaga homogenitas genetik, meskipun populasi tersebut mungkin berfungsi sebagai unit demografis yang sebagian besar independen. Inilah sebabnya mengapa pendekatan holistik yang menggabungkan bukti dari genetika, penandaan, dan metode lain sangat penting.

C. Konsep Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP-RI) di Indonesia

Setelah memahami konsep biologis dari stok dan berbagai metode ilmiah untuk mengidentifikasinya, langkah selanjutnya adalah melihat bagaimana konsep ini diterjemahkan ke dalam kerangka kerja pengelolaan praktis di tingkat nasional. Di Indonesia, unit geografis utama untuk pengelolaan perikanan adalah Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia, yang disingkat WPP-RI.

WPP-RI adalah pembagian wilayah perairan yurisdiksi Indonesia (laut teritorial, perairan kepulauan, dan Zona Ekonomi Eksklusif) menjadi unit-unit geografis yang lebih kecil untuk tujuan pengelolaan, pemantauan, dan penegakan hukum perikanan. Konsep WPP-RI adalah upaya pemerintah untuk menerapkan pendekatan spasial dalam pengelolaan perikanan, dengan mengakui bahwa kondisi sumber daya ikan dan ekosistemnya bervariasi di seluruh perairan nusantara yang luas.

Dasar Hukum dan Tujuan Penetapan WPP-RI didasarkan pada Undang-Undang Nomor 31 Tahun 2004 tentang Perikanan, sebagaimana telah

diubah dengan Undang-Undang Nomor 45 Tahun 2009. Tujuan utama dari pembagian wilayah ini adalah untuk:

1. Mewujudkan Pengelolaan Perikanan yang Berkelanjutan: Dengan membagi wilayah yang luas menjadi unit yang lebih mudah dikelola, diharapkan penilaian stok dan penerapan kebijakan dapat dilakukan secara lebih terfokus dan sesuai dengan kondisi lokal.
2. Mendukung Pendekatan Kehati-hatian (*Precautionary Approach*): Dengan memiliki unit-unit pengelolaan yang jelas, potensi sumber daya di setiap WPP dapat diperkirakan, dan tingkat pemanfaatan dapat diatur agar tidak melebihi daya dukungnya.
3. Menyediakan Kerangka Kerja untuk Pengumpulan Data: WPP-RI menyediakan sistem kerangka spasial yang terstandarisasi untuk pengumpulan data statistik perikanan, survei ilmiah, dan pemantauan sumber daya.
4. Memfasilitasi Penegakan Hukum dan Alokasi Upaya: Batas-batas WPP yang jelas membantu dalam pengawasan dan penegakan hukum terhadap peraturan perikanan, serta dapat digunakan sebagai dasar untuk alokasi upaya penangkapan.

Hubungan antara WPP-RI dan Konsep Stok Idealnya, batas-batas dari setiap WPP-RI seharusnya sejajar dengan batas-batas dari unit stok biologis utama. Dengan kata lain, setiap WPP diharapkan dapat mencakup satu atau beberapa stok ikan yang sebagian besar siklus hidupnya berada di dalam wilayah tersebut. Namun, dalam praktiknya, ini adalah tantangan yang sangat besar.

1. Kompleksitas Biologis: Seperti yang telah kita lihat, banyak spesies ikan (terutama ikan pelagis besar) melakukan migrasi yang melintasi batas-batas geografis yang luas. Satu stok tuna, misalnya, dapat dengan mudah melintasi beberapa WPP-RI.
2. Pertimbangan Praktis dan Administratif: Penetapan batas WPP-RI tidak hanya didasarkan pada pertimbangan biologis, tetapi juga pada batas-batas administratif (misalnya, batas provinsi), karakteristik oseanografi, dan pertimbangan praktis untuk pengawasan dan penegakan hukum.

Akibatnya, WPP-RI harus dipandang sebagai unit pengelolaan praktis, bukan sebagai definisi yang sempurna dari unit stok biologis. Meskipun demikian, WPP-RI adalah langkah maju yang sangat penting. Ia menyediakan kerangka kerja di mana studi identifikasi stok yang lebih rinci dapat dilakukan. Penelitian ilmiah dapat difokuskan untuk memahami struktur stok di dalam dan di antara WPP-RI. Seiring dengan bertambahnya pengetahuan ilmiah, ada kemungkinan bahwa batas-batas WPP-RI dapat disesuaikan di masa depan agar lebih selaras dengan realitas biologis dari stok ikan.

Pembagian WPP-RI

Berdasarkan Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Nomor 18/PERMEN-KP/2014, perairan Indonesia dibagi menjadi 11 (sebelas) Wilayah Pengelolaan Perikanan. Setiap WPP diberi kode numerik tiga digit dan mencakup wilayah perairan tertentu dengan karakteristik oseanografi dan ekologis yang relatif berbeda.

Berikut adalah daftar 11 WPP-RI tersebut beserta cakupan wilayah utamanya:

1. WPP-RI 571: Meliputi perairan Selat Malaka dan Laut Andaman.
2. WPP-RI 572: Meliputi perairan Samudra Hindia di sebelah Barat Sumatera dan Selat Sunda.
3. WPP-RI 573: Meliputi perairan Samudra Hindia di sebelah Selatan Jawa hingga Nusa Tenggara, Laut Sawu, dan Laut Timor bagian Barat.
4. WPP-RI 711: Meliputi perairan Selat Karimata, Laut Natuna, dan Laut Cina Selatan.
5. WPP-RI 712: Meliputi perairan Laut Jawa.
6. WPP-RI 713: Meliputi perairan Selat Makassar, Teluk Bone, Laut Flores, dan Laut Bali.
7. WPP-RI 714: Meliputi perairan Teluk Tolo dan Laut Banda.
8. WPP-RI 715: Meliputi perairan Teluk Tomini, Laut Maluku, Laut Halmahera, Laut Seram, dan Teluk Berau.
9. WPP-RI 716: Meliputi perairan Laut Sulawesi dan sebelah Utara Pulau Halmahera.

10. WPP-RI 717: Meliputi perairan Teluk Cendrawasih dan Samudra Pasifik.
11. WPP-RI 718: Meliputi perairan Laut Aru, Laut Arafuru, dan Laut Timor bagian Timur.

Penerapan Pengelolaan di Tingkat WPP-RI Untuk setiap WPP-RI, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) melalui Komisi Nasional Pengkajian Sumber Daya Ikan (Komnas Kajiskan) secara berkala melakukan penilaian untuk mengestimasi potensi sumber daya ikan (biasanya dalam bentuk potensi hasil tangkapan lestari atau MSY) dan tingkat pemanfaatannya. Hasil penilaian ini kemudian digunakan untuk menentukan status stok di setiap WPP, yang biasanya dikategorikan menjadi:

1. Hijau (*Moderately exploited*): Tingkat pemanfaatan masih di bawah potensi lestari. Upaya penangkapan masih dapat ditingkatkan secara hati-hati.
2. Kuning (*Fully exploited*): Tingkat pemanfaatan telah mencapai atau mendekati potensi lestari. Upaya penangkapan tidak boleh ditambah dan harus dikendalikan.
3. Merah (*Over exploited*): Tingkat pemanfaatan telah melebihi potensi lestari. Upaya penangkapan harus segera dikurangi untuk memungkinkan stok pulih.

Berdasarkan status ini, berbagai langkah pengelolaan dapat diterapkan secara spesifik untuk WPP tertentu, seperti pembatasan jumlah izin kapal, pengaturan jenis alat tangkap, penutupan musim atau daerah, dan langkah-langkah lainnya. Konsep WPP-RI, meskipun tidak sempurna, menyediakan fondasi yang sangat diperlukan untuk menerapkan pengelolaan perikanan yang lebih terukur, berbasis data, dan adaptif di seluruh wilayah perairan Indonesia yang sangat kompleks.

Setelah memahami bagaimana populasi ikan bertambah melalui reproduksi dan bagaimana individu di dalamnya tumbuh, kita sekarang beralih ke sisi lain dari persamaan dinamika populasi: proses pengurangan. Mortalitas, atau laju kematian, adalah salah satu dari dua proses utama (selain emigrasi) yang menyebabkan penurunan jumlah dan biomassa individu dalam suatu stok. Memahami dan mengkuantifikasi mortalitas adalah hal yang mutlak diperlukan untuk penilaian stok, karena tujuan utama pengelolaan perikanan adalah untuk menyeimbangkan penambahan biomassa (melalui rekrutmen dan pertumbuhan) dengan pengurangan biomassa (melalui mortalitas alami dan penangkapan).

Dalam biologi perikanan, kita tidak berfokus pada kematian individu ikan tertentu, melainkan pada laju mortalitas untuk seluruh populasi atau kohort. Laju mortalitas adalah proporsi dari populasi yang mati dalam satu unit waktu tertentu (biasanya satu tahun). Asumsi dasar yang paling umum digunakan dalam model perikanan adalah bahwa penurunan jumlah individu dalam suatu kohort dari waktu ke waktu mengikuti model peluruhan eksponensial.

Ini berarti bahwa jika kita memulai dengan sejumlah individu (N_0) pada waktu $t=0$, maka jumlah individu yang tersisa (N_t) pada waktu t dapat digambarkan dengan persamaan:

$$N_t = N_0 e^{-Zt}$$

dimana:

1. N_0 adalah jumlah individu awal.
2. N_t adalah jumlah individu pada waktu t .
3. e adalah basis logaritma natural (sekitar 2.718).
4. Z adalah koefisien mortalitas total sesaat (*instantaneous total mortality rate*).

Parameter Z inilah yang menjadi fokus utama dalam analisis mortalitas. Ia merepresentasikan laju penurunan proporsional dari populasi pada setiap saat. Meskipun konsep “sesaat” ini bersifat teoretis, ia memiliki sifat matematis yang sangat nyaman yang membuatnya menjadi dasar dari sebagian besar model perikanan.

Penyebab kematian dalam populasi ikan liar dapat dibagi menjadi dua kategori utama. Oleh karena itu, koefisien mortalitas total (Z) juga dapat dipecah menjadi dua komponen utama yang saling melengkapi. Pemisahan ini adalah salah satu konsep paling fundamental dalam dinamika populasi perikanan.

A. Konsep Mortalitas

1. Mortalitas Total (Z), Mortalitas Alami (M), dan Mortalitas Penangkapan (F)

Koefisien mortalitas total sesaat (Z) mencakup semua penyebab kematian dalam suatu populasi. Dalam populasi yang dieksploitasi, penyebab-penyebab ini dapat dikelompokkan menjadi dua sumber utama:

- a. Mortalitas Alami (*Natural Mortality* - M): Ini adalah laju kematian yang disebabkan oleh semua faktor selain penangkapan oleh manusia. Mortalitas alami mencakup berbagai penyebab, seperti:
 - 1) Predasi: Dimangsa oleh ikan lain, mamalia laut, burung laut, atau predator lainnya. Ini sering kali merupakan komponen terbesar dari M , terutama untuk ikan-ikan muda.
 - 2) Penyakit dan Parasit: Kematian akibat infeksi bakteri, virus, jamur, atau beban parasit yang berat.
 - 3) Kelaparan (*Starvation*): Kematian karena kegagalan dalam menemukan makanan yang cukup.
 - 4) Usia Tua (*Senescence*): Meskipun jarang terjadi pada populasi yang dieksploitasi berat, beberapa ikan dapat mati karena penuaan fisiologis.

- 5) Stres Lingkungan: Kematian akibat kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti suhu yang terlalu tinggi atau rendah, atau kadar oksigen yang sangat rendah (hipoksia).

Mortalitas alami (M) dianggap terjadi secara terus-menerus sepanjang hidup ikan, meskipun lajunya mungkin lebih tinggi pada tahap-tahap kehidupan yang lebih muda dan lebih rentan. Dalam banyak model perikanan, M sering kali diasumsikan konstan untuk semua umur ikan yang telah direkrut ke dalam perikanan, meskipun ini adalah penyederhanaan dari realitas yang kompleks.

- b. Mortalitas Penangkapan (*Fishing Mortality* - F): Ini adalah laju kematian yang disebabkan secara langsung oleh aktivitas perikanan. Mortalitas penangkapan adalah satu-satunya komponen mortalitas yang dapat dikontrol secara langsung oleh manajer perikanan melalui berbagai regulasi (misalnya, dengan membatasi jumlah kapal, waktu penangkapan, atau total hasil tangkapan). Oleh karena itu, mengestimasi dan mengelola F adalah inti dari sebagian besar upaya pengelolaan perikanan. Nilai F tidak konstan; ia berbanding lurus dengan upaya penangkapan (*fishing effort*). Jika upaya penangkapan (misalnya, jumlah hari melaut dari kapal pukat) berlipat ganda, maka F juga diasumsikan akan berlipat ganda.

2. Hubungan $Z = F + M$

Karena mortalitas alami dan mortalitas penangkapan adalah dua komponen yang membentuk mortalitas total, dan karena laju sesaat ini bersifat aditif, maka hubungan fundamental antara ketiganya dapat dinyatakan dalam persamaan yang sederhana namun sangat kuat:

$$Z = F + M$$

Persamaan ini adalah landasan dari banyak analisis dinamika populasi. Ia menyatakan bahwa laju total di mana populasi menurun (Z) adalah jumlah dari laju di mana ia menurun karena penyebab alami (M) dan laju di mana ia menurun karena penangkapan (F).

Memahami hubungan ini memungkinkan kita untuk menganalisis dampak perikanan pada suatu stok. Dalam populasi yang belum dieksploitasi (*unfished*), tidak ada mortalitas penangkapan ($F=0$), sehingga mortalitas

total sama dengan mortalitas alami ($Z=M$). Seiring dengan berkembangnya perikanan, F meningkat dari nol, dan Z menjadi lebih besar dari M .

Tujuan dari penilaian stok sering kali adalah untuk mengestimasi nilai Z , F , dan M secara terpisah.

- 1) Z (Mortalitas Total) biasanya dapat diestimasi langsung dari data struktur umur hasil tangkapan.
- 2) M (Mortalitas Alami) sering kali merupakan parameter yang paling sulit diestimasi secara langsung. Biasanya, ia diperkirakan dengan menggunakan metode empiris berdasarkan parameter sejarah kehidupan lainnya.
- 3) F (Mortalitas Penangkapan) kemudian dapat dihitung sebagai selisihnya: $F = Z - M$.

Setelah F diketahui, manajer dapat membandingkannya dengan titik referensi target (misalnya, F_{MSY} , laju penangkapan yang menghasilkan hasil tangkapan maksimum yang lestari) untuk menentukan apakah stok tersebut mengalami penangkapan berlebih atau tidak. Jika F saat ini lebih besar dari F_{MSY} , maka tindakan pengelolaan untuk mengurangi upaya penangkapan diperlukan. Proses untuk mengestimasi masing-masing komponen mortalitas ini akan menjadi fokus dari sisa bab ini.

B. Metode Pendugaan Mortalitas Alami (M)

Dari tiga koefisien mortalitas (Z , F , dan M), mortalitas alami (M) adalah yang paling sulit untuk diestimasi secara langsung dari populasi liar. Alasannya sederhana: di alam, ikan yang mati karena penyebab alami (misalnya, dimangsa atau sakit) jarang sekali dapat diamati atau dihitung. Mereka menghilang begitu saja dari populasi tanpa meninggalkan jejak yang mudah diukur. Berbeda dengan mortalitas penangkapan (F) yang dapat kita amati melalui hasil tangkapan, atau mortalitas total (Z) yang dapat kita simpulkan dari penurunan jumlah kohort, M sering kali menjadi "kotak hitam" dalam dinamika populasi.

Namun, estimasi M yang andal sangatlah penting. Nilai M menentukan produktivitas intrinsik suatu stok. Stok dengan M tinggi secara alami mengalami perputaran (*turnover*) yang cepat dan mungkin lebih produktif,

sedangkan stok dengan M rendah memiliki perputaran yang lambat. Kesalahan dalam mengestimasi M akan secara langsung menyebabkan kesalahan dalam mengestimasi F (karena $F = Z - M$). Jika kita mengestimasi M terlalu tinggi, kita akan mengestimasi F terlalu rendah, yang dapat memberikan rasa aman yang palsu dan mengarah pada penangkapan berlebih. Sebaliknya, jika kita mengestimasi M terlalu rendah, kita akan mengestimasi F terlalu tinggi, yang dapat menyebabkan regulasi yang terlalu ketat dan kehilangan potensi hasil tangkapan.

Karena kesulitan dalam pengukuran langsung, sebagian besar metode untuk mengestimasi M bersifat tidak langsung. Metode-metode ini bekerja dengan mengasumsikan bahwa laju mortalitas alami suatu spesies berkorelasi dengan parameter-parameter sejarah kehidupan lain yang lebih mudah diukur, seperti laju pertumbuhan, umur maksimum, atau suhu lingkungan. Pendekatan ini didasarkan pada logika ekologis bahwa strategi sejarah kehidupan suatu organisme adalah satu paket yang terintegrasi. Ikan yang tumbuh cepat dan berumur pendek secara logis juga harus memiliki laju mortalitas alami yang tinggi, dan sebaliknya.

Metode yang paling umum digunakan untuk mengestimasi M adalah model-model empiris. Model-model ini dikembangkan dengan mengumpulkan data tentang laju pertumbuhan, umur maksimum, dan estimasi M dari berbagai macam stok ikan di seluruh dunia, dan kemudian menggunakan analisis regresi untuk menemukan hubungan statistik antara variabel-variabel tersebut. Meskipun tidak sempurna, model-model ini menyediakan cara yang objektif dan dapat diulang untuk mendapatkan perkiraan M yang masuk akal ketika data lain tidak tersedia.

Model Empiris Pauly (1980)

Salah satu model empiris yang paling terkenal dan paling banyak digunakan untuk mengestimasi M adalah model yang dikembangkan oleh Daniel Pauly pada tahun 1980. Pauly mengumpulkan data dari 175 stok ikan yang berbeda dari seluruh dunia, yang mencakup berbagai kelompok taksonomi dan lingkungan, dan melakukan analisis regresi berganda untuk menemukan prediktor terbaik dari M .

Ia menemukan bahwa M secara signifikan berkorelasi dengan tiga parameter yang relatif mudah diperoleh dari studi pertumbuhan:

1. Panjang Asimtotik (L_{∞}): Dari fungsi pertumbuhan *von Bertalanffy* (dalam cm).
2. Koefisien Pertumbuhan (K): Dari fungsi pertumbuhan *von Bertalanffy* (dalam satuan per tahun).
3. Suhu Rata-rata Tahunan Lingkungan (T): Suhu air rata-rata (dalam °C) di mana stok tersebut hidup.

Logika di Balik Model Pauly:

1. Hubungan dengan L_{∞} dan K: Pauly beralasan bahwa ikan yang lebih kecil (L_{∞} rendah) dan ikan yang tumbuh lebih cepat (K tinggi) cenderung memiliki laju metabolisme yang lebih tinggi dan lebih rentan terhadap predasi, sehingga seharusnya memiliki M yang lebih tinggi.
2. Hubungan dengan Suhu (T): Suhu adalah penggerak utama laju metabolisme pada ikan. Ikan yang hidup di perairan yang lebih hangat memiliki laju metabolisme yang lebih tinggi, lebih aktif, menua lebih cepat, dan sering kali menghadapi tekanan predasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, ikan di perairan tropis yang hangat diharapkan memiliki M yang lebih tinggi daripada ikan di perairan kutub yang dingin, bahkan jika parameter pertumbuhannya sama.

Persamaan Model Pauly: Setelah analisis regresi, Pauly menghasilkan persamaan empiris berikut:

$$\log_{10}(M) = -0.0066 - 0.279 \cdot \log_{10}(L_{\infty}) + 0.6543 \cdot \log_{10}(K) + 0.4634 \cdot \log_{10}(T)$$

dimana:

1. M adalah koefisien mortalitas alami sesaat (per tahun).
2. L_{∞} adalah panjang asimtotik dalam cm (biasanya panjang total).
3. K adalah koefisien pertumbuhan (per tahun).
4. T adalah suhu air rata-rata tahunan dalam derajat Celsius.

Cara Menggunakan Model Pauly: Untuk menggunakan model ini, seorang peneliti hanya perlu memasukkan nilai L_{∞} dan K yang telah diestimasi dari analisis pertumbuhan untuk stok target, serta mencari

data suhu rata-rata untuk habitatnya. Dengan memasukkan nilai-nilai ini ke dalam persamaan, nilai M dapat dihitung.

Contoh: Misalkan untuk stok ikan kembung di Laut Jawa, kita memiliki parameter pertumbuhan $L_{\infty} = 25$ cm dan $K = 0.8$ per tahun. Suhu rata-rata Laut Jawa adalah sekitar 28°C .

- $\log_{10}(L_{\infty}) = \log_{10}(25) \approx 1.398$
- $\log_{10}(K) = \log_{10}(0.8) \approx -0.097$
- $\log_{10}(T) = \log_{10}(28) \approx 1.447$

Maka, $\log_{10}(M) = -0.0066 - 0.279(1.398) + 0.6543(-0.097) + 0.4634(1.447)$
 $\log_{10}(M) = -0.0066 - 0.390 - 0.063 + 0.670 \approx 0.21$ $M = 100.21 \approx 1.62$ per tahun

Nilai M yang tinggi ini (1.62) konsisten dengan apa yang kita harapkan untuk ikan tropis kecil yang tumbuh cepat dan berumur pendek seperti kembung.

Kelebihan dan Kekurangan: Keuntungan besar dari model Pauly adalah kemudahan penggunaannya dan fakta bahwa ia didasarkan pada parameter yang hampir selalu diestimasi dalam studi biologi perikanan. Namun, ia juga memiliki keterbatasan. Karena merupakan model empiris, ia mungkin tidak bekerja dengan baik untuk spesies yang sangat tidak biasa atau yang tidak terwakili dengan baik dalam set data asli Pauly (misalnya, ikan kutub atau ikan laut dalam). Meskipun demikian, model ini tetap menjadi titik awal yang paling umum dan sangat berharga untuk mendapatkan perkiraan pertama dari M.

Model Empiris Hoenig (1983)

Metode empiris populer lainnya dikembangkan oleh John Hoenig pada tahun 1983. Pendekatan Hoenig berbeda dari Pauly; alih-alih menggunakan parameter pertumbuhan, Hoenig berfokus pada satu parameter sejarah kehidupan yang sangat intuitif: umur maksimum (t_{max}).

Logika di Balik Model Hoenig: Logikanya sangat sederhana dan kuat: ada hubungan terbalik yang kuat antara seberapa lama suatu spesies dapat hidup dan laju mortalitas tahunannya. Spesies yang secara alami dapat hidup hingga usia yang sangat tua (misalnya, 100 tahun) pastilah

memiliki laju mortalitas alami tahunan yang sangat rendah. Sebaliknya, spesies yang umur maksimumnya hanya 3 tahun pastilah mengalami laju mortalitas alami yang sangat tinggi. Jika tidak, semua individu akan dengan mudah mencapai umur yang jauh lebih tua. Dengan kata lain, t_{max} adalah refleksi dari laju mortalitas total (Z) seumur hidup, dan pada populasi yang belum dieksploitasi, $Z = M$.

Hoening mengumpulkan data tentang estimasi mortalitas total (Z) dan umur maksimum (t_{max}) dari 84 stok ikan dan 49 stok moluska yang belum atau hanya dieksploitasi secara ringan (sehingga Z dapat dianggap sebagai perkiraan yang baik untuk M). Ia kemudian melakukan analisis regresi untuk menemukan hubungan antara kedua variabel tersebut.

Persamaan Model Hoening: Hoening menemukan hubungan linier yang kuat pada skala log-log dan menghasilkan dua persamaan terpisah, satu untuk ikan dan satu untuk moluska.

- **Untuk Ikan:**

$$\ln(Z) = 1.44 - 0.982 \cdot \ln(t_{max})$$

(Karena $Z \approx M$ untuk data yang digunakan, persamaan ini digunakan untuk mengestimasi M)

$$\ln(M) = 1.44 - 0.982 \cdot \ln(t_{max})$$

- **Untuk Moluska (*Invertebrata*):**

$$\ln(M) = 1.23 - 0.832 \cdot \ln(t_{max})$$

dimana:

- M adalah koefisien mortalitas alami sesaat (per tahun).
- t_{max} adalah umur maksimum yang diketahui atau diobservasi untuk spesies tersebut (dalam tahun).

Cara Menggunakan Model Hoening: Untuk menggunakan model ini, seorang peneliti hanya memerlukan satu informasi: estimasi yang andal tentang umur maksimum (t_{max}) dari spesies yang diteliti. Informasi ini bisa didapat dari literatur, dari studi penentuan umur pada populasi yang dieksploitasi secara ringan, atau hanya dari umur tertua yang pernah tercatat dalam sampel yang sangat besar.

Contoh: Misalkan kita mempelajari stok ikan kerapu yang diketahui dapat hidup hingga umur maksimum sekitar 30 tahun ($t_{max}=30$).

- $\ln(t_{max})=\ln(30)\approx 3.40$
- $\ln(M)=1.44-0.982(3.40)=1.44-3.339\approx -1.899$
- $M=e^{-1.899}\approx 0.15$ per tahun

Nilai M yang rendah ini (0.15) konsisten dengan apa yang kita harapkan untuk ikan demersal yang tumbuh lambat dan berumur panjang seperti kerapu.

Kelebihan dan Kekurangan: Keuntungan utama model Hoenig adalah kesederhanaannya yang luar biasa. Ia hanya membutuhkan satu parameter input (t_{max}), yang secara konseptual mudah dipahami. Model ini sangat berguna ketika data pertumbuhan tidak tersedia tetapi ada informasi tentang rentang hidup spesies. Kelemahannya adalah estimasi t_{max} itu sendiri bisa jadi tidak pasti. Umur maksimum yang teramati dalam sampel sangat bergantung pada ukuran sampel; semakin banyak ikan yang Anda periksa, semakin besar kemungkinan Anda menemukan individu yang sangat tua. Oleh karena itu, t_{max} yang diamati sering kali merupakan estimasi yang lebih rendah dari t_{max} yang sebenarnya, yang dapat menyebabkan M diestimasi sedikit lebih tinggi. Meskipun demikian, model Hoenig adalah alternatif yang sangat baik dan sering digunakan bersamaan dengan model Pauly untuk mendapatkan rentang nilai M yang masuk akal.

Metode Pendugaan M Lainnya

Selain model Pauly dan Hoenig yang paling populer, ada beberapa pendekatan lain yang juga digunakan untuk mendapatkan perkiraan M. Metode-metode ini juga sering kali bersifat empiris dan didasarkan pada hubungan antara M dan parameter sejarah kehidupan lainnya.

1. Metode Berbasis Umur Kematangan Seksual (Rikhter dan Efanov, 1976)
Metode ini mirip dengan pendekatan Hoenig, tetapi menggunakan umur saat pertama kali matang gonad secara massal (t_m) sebagai prediktor utama. Logikanya adalah bahwa spesies yang matang pada usia yang lebih tua cenderung memiliki mortalitas alami yang lebih rendah. Mereka menemukan hubungan berikut:

$$M = t_m 0.7201.521 - 0.155$$

dimana t_m adalah umur di mana 50% dari populasi telah mencapai kematangan seksual. Metode ini berguna karena t_m adalah parameter yang sering diestimasi dalam studi biologi reproduksi.

2. Metode Berbasis Invarian Sejarah Kehidupan (*Life History Invariants*) Pendekatan ini didasarkan pada pengamatan bahwa rasio antara beberapa parameter sejarah kehidupan cenderung relatif konstan (invarian) di antara berbagai spesies ikan. Salah satu invarian yang paling sering dikutip adalah rasio antara mortalitas alami (M) dan koefisien pertumbuhan *von Bertalanffy* (K).
 - Rasio M/K : Beverton dan Holt (1959), dalam analisis mereka terhadap berbagai stok ikan, menemukan bahwa rasio M/K untuk sebagian besar spesies cenderung berada dalam rentang yang relatif sempit, biasanya antara 1.5 hingga 2.5.
 - Penggunaan: Jika kita memiliki estimasi yang andal untuk K dari analisis pertumbuhan, kita dapat menggunakan rasio ini untuk mendapatkan perkiraan kasar untuk M . Misalnya, jika $K = 0.2$ per tahun, maka M diperkirakan berada di antara $(1.5 \times 0.2) = 0.3$ dan $(2.5 \times 0.2) = 0.5$. Ini bukan metode yang sangat presisi, tetapi sangat berguna sebagai "pemeriksaan kewajaran" (*sanity check*) untuk estimasi M yang diperoleh dari metode lain. Jika model Pauly memberikan $M = 1.5$, sementara $K = 0.2$ (yang menghasilkan rasio $M/K = 7.5$), ini menunjukkan adanya ketidakkonsistenan yang perlu diselidiki lebih lanjut.
3. Metode Berbasis Predator (*Predator-based Methods*) Pendekatan ini berbeda secara fundamental dari model empiris. Alih-alih mencari korelasi statistik, metode ini mencoba untuk mengestimasi M secara langsung dengan mengkuantifikasi sumber utama mortalitas alami: predasi.
 - a. Prosedur: Metode ini memerlukan data yang sangat detail tentang ekosistem. Peneliti perlu:
 - 1) Mengidentifikasi semua predator utama dari spesies target.

- 2) Mengestimasi kelimpahan (biomassa) dari setiap populasi predator tersebut.
 - 3) Menganalisis kebiasaan makanan dari setiap predator untuk menentukan proporsi spesies target dalam diet mereka.
 - 4) Mengestimasi laju konsumsi makanan total oleh setiap populasi predator.
- b. Perhitungan: Dengan mengalikan biomassa predator dengan laju konsumsi dan proporsi diet, kita dapat mengestimasi total biomassa spesies target yang dimakan oleh semua predator dalam satu tahun. Nilai ini kemudian dapat diubah menjadi laju mortalitas predasi, yang sering dianggap sebagai komponen utama dari M .
- c. Kelebihan dan Kekurangan: Keuntungan dari metode ini adalah ia didasarkan pada proses ekologis yang sebenarnya. Ini adalah pendekatan yang digunakan dalam model ekosistem yang kompleks seperti *Ecopath with Ecosim* (EwE). Namun, kelemahannya adalah kebutuhan datanya sangat besar dan sering kali tidak realistis untuk dipenuhi di banyak sistem. Mengestimasi kelimpahan dan diet semua predator utama adalah tugas yang sangat besar. Oleh karena itu, metode ini jarang digunakan untuk penilaian stok spesies tunggal rutin, tetapi sangat penting dalam konteks pemodelan ekosistem yang lebih luas.

Ketidakpastian dan Praktik Terbaik dalam Mengestimasi M

Jelas bahwa tidak ada satu cara pun yang sempurna untuk mengukur mortalitas alami. Setiap metode memiliki asumsi dan keterbatasannya sendiri. M tetap menjadi salah satu sumber ketidakpastian terbesar dalam penilaian stok perikanan. Oleh karena itu, sangat penting bagi para ilmuwan dan manajer perikanan untuk secara eksplisit mengakui dan menangani ketidakpastian ini.

Praktik Terbaik yang Dianjurkan:

1. Gunakan Beberapa Metode: Jangan pernah hanya mengandalkan satu metode tunggal untuk mengestimasi M . Praktik terbaik adalah dengan menggunakan beberapa pendekatan yang berbeda (misalnya, model Pauly, model Hoenig, dan rasio M/K) dan membandingkan hasilnya.

Jika hasilnya serupa, ini memberikan keyakinan yang lebih besar. Jika hasilnya sangat berbeda, ini menyoroiti tingkat ketidakpastian yang tinggi.

2. Dapatkan Rentang Nilai yang Masuk Akal: Alih-alih memilih satu nilai tunggal untuk M , sering kali lebih baik untuk menentukan rentang nilai M yang masuk akal berdasarkan hasil dari berbagai metode. Misalnya, seorang peneliti mungkin menyimpulkan bahwa nilai M untuk stok tertentu kemungkinan besar berada di antara 0.2 dan 0.4 per tahun.
3. Lakukan Analisis Sensitivitas (*Sensitivity Analysis*): Ini adalah langkah yang sangat penting. Setelah mendapatkan rentang nilai M yang masuk akal, peneliti harus menjalankan model penilaian stok mereka beberapa kali, setiap kali dengan menggunakan nilai M yang berbeda dari dalam rentang tersebut (misalnya, M rendah = 0.2, M sedang = 0.3, M tinggi = 0.4). Dengan melakukan ini, mereka dapat melihat seberapa sensitif output dari model (seperti estimasi F atau MSY) terhadap asumsi tentang M .
 - a. Jika output model tidak banyak berubah ketika nilai M yang berbeda digunakan, maka ketidakpastian tentang M bukanlah masalah besar.
 - b. Namun, jika output dan rekomendasi pengelolaan berubah secara drastis tergantung pada nilai M yang digunakan, maka ini menunjukkan bahwa ketidakpastian tentang M adalah sumber risiko utama. Dalam kasus seperti ini, pendekatan yang paling hati-hati (*precautionary*) adalah dengan mengadopsi asumsi M yang lebih konservatif (biasanya, nilai yang lebih rendah) atau secara eksplisit memasukkan ketidakpastian ini ke dalam nasihat pengelolaan.
4. Gunakan Informasi Spesies Serupa: Jika data sangat terbatas untuk spesies target, melihat nilai M yang dilaporkan untuk spesies yang berkerabat dekat dengan sejarah kehidupan yang serupa di lokasi lain dapat memberikan titik awal yang berguna.

Singkatnya, mengestimasi M adalah tentang membuat tebakan terbaik yang terinformasi berdasarkan bukti yang tersedia. Mengakui

bahwa ini adalah sebuah “estimasi” dengan ketidakpastian yang melekat, dan kemudian secara eksplisit menguji bagaimana ketidakpastian ini mempengaruhi kesimpulan kita, adalah inti dari pendekatan ilmiah dan kehati-hatian dalam pengelolaan perikanan.

C. Metode Pendugaan Mortalitas Total (Z) dan Mortalitas Penangkapan (F)

Berbeda dengan mortalitas alami (M) yang sulit diamati, mortalitas total (Z) dapat diestimasi secara langsung dari data yang dikumpulkan dari perikanan, khususnya dari data komposisi umur hasil tangkapan. Setelah Z berhasil diestimasi, dan dengan adanya perkiraan untuk M, kita kemudian dapat menghitung komponen yang paling penting untuk pengelolaan, yaitu mortalitas penangkapan (F), menggunakan hubungan fundamental: $F = Z - M$.

Metode-metode untuk mengestimasi Z semuanya didasarkan pada prinsip yang sama: mengukur laju penurunan kelimpahan dari suatu kohort (kelompok umur) dari waktu ke waktu. Dalam populasi yang stabil, penurunan jumlah ikan dari satu kelas umur ke kelas umur berikutnya dalam sampel yang representatif dari populasi mencerminkan laju mortalitas total yang dialami oleh populasi tersebut.

Asumsi dasar di balik metode-metode ini adalah model peluruhan eksponensial yang telah kita bahas:

$$N_t = N_0 e^{-Zt}$$

Jika kita mengambil logaritma natural dari kedua sisi persamaan ini, kita mendapatkan:

$$\ln(N_t) = \ln(N_0) - Zt$$

Persamaan ini memiliki bentuk persamaan garis lurus, $y = a + bx$, di mana:

- $y = \ln(N_t)$ (logaritma dari jumlah ikan pada umur t)
- $a = \ln(N_0)$ (intersep)
- $b = -Z$ (kemiringan atau slope)
- $x = t$ (umur)

Ini berarti bahwa jika kita memplot logaritma dari kelimpahan terhadap umur, kita seharusnya mendapatkan garis lurus dengan kemiringan yang nilainya adalah negatif dari koefisien mortalitas total ($-Z$). Prinsip inilah yang menjadi dasar dari metode yang paling umum digunakan untuk mengestimasi Z , yaitu analisis kurva hasil tangkapan (*catch curve analysis*).

Analisis Kurva Hasil Tangkapan (*Catch Curve Analysis*)

Kurva hasil tangkapan adalah metode klasik dan kuat untuk mengestimasi Z dari data komposisi umur hasil tangkapan. Metode ini pada dasarnya adalah penerapan grafis dan statistik dari persamaan peluruhan eksponensial yang telah dilinearkan.

Data yang Dibutuhkan: Untuk membuat kurva hasil tangkapan, kita memerlukan data jumlah ikan pada setiap kelas umur dalam sampel hasil tangkapan yang representatif. Data ini biasanya diperoleh dengan:

1. Mengambil sampel acak yang besar dari hasil tangkapan komersial.
2. Mengukur panjang setiap ikan dalam sampel (data frekuensi panjang).
3. Mengambil sub-sampel dari ikan-ikan tersebut untuk penentuan umur (misalnya, dengan membaca otolit).
4. Menggunakan hasil dari sub-sampel umur untuk membuat kunci umur-panjang (*Age-Length Key* - ALK). ALK adalah tabel yang menunjukkan proporsi ikan pada setiap umur untuk setiap interval panjang tertentu.
5. Menerapkan ALK pada data frekuensi panjang keseluruhan untuk mengkonversi seluruh distribusi panjang menjadi distribusi umur hasil tangkapan (yaitu, estimasi jumlah total ikan yang tertangkap pada umur 1, umur 2, umur 3, dst.).

Logika dan Prosedur: Setelah kita memiliki data jumlah ikan pada setiap umur (N_t), prosedur untuk membuat kurva hasil tangkapan adalah sebagai berikut:

1. Asumsi Keseimbangan (*Equilibrium*): Metode ini bekerja paling baik jika populasi dan perikanan berada dalam kondisi keseimbangan (*equilibrium*), yang berarti rekrutmen (jumlah ikan baru yang masuk setiap tahun) dan mortalitas penangkapan (F) diasumsikan relatif konstan selama beberapa tahun terakhir. Jika asumsi ini terpenuhi,

maka struktur umur dalam populasi (dan dalam hasil tangkapan) akan stabil. Dalam kondisi ini, jumlah relatif ikan pada umur 3, 4, 5, dst. dalam sampel tahun ini dapat dianggap sebagai representasi dari apa yang akan terjadi pada kohort umur 2 tahun ini ketika ia menjadi berumur 3, 4, 5, dst. di tahun-tahun mendatang. Dengan kata lain, kita dapat mengganti analisis kohort yang sebenarnya (mengikuti satu kelompok umur dari waktu ke waktu) dengan analisis data dari satu waktu (data cross-sectional).

2. Plot Data: Plot jumlah ikan (N_t) terhadap umur (t). Plot ini biasanya akan menunjukkan pola di mana jumlahnya rendah pada umur yang sangat muda (karena mereka belum sepenuhnya rentan terhadap alat tangkap), kemudian naik ke puncak pada umur rekrutmen penuh, dan kemudian menurun secara eksponensial untuk umur-umur yang lebih tua.
3. Transformasi Logaritmik: Hitung logaritma natural dari jumlah ikan pada setiap umur, $\ln(N_t)$.
4. Plot Kurva Hasil Tangkapan yang Dilinearkan: Buat plot baru dengan umur (t) pada sumbu X dan $\ln(N_t)$ pada sumbu Y. Plot inilah yang disebut kurva hasil tangkapan yang dilinearkan (*linearized catch curve*).

Interpretasi Grafis dari Kurva Hasil Tangkapan

Plot dari $\ln(N_t)$ terhadap umur (t) akan menunjukkan pola yang khas, yang dapat dibagi menjadi tiga bagian:

1. Bagian Menaik (*Ascending Limb*) di Sisi Kiri: Bagian ini mencakup kelas-kelas umur termuda. Titik-titik di sini akan membentuk kurva yang menanjak. Ini tidak berarti populasi ikan muda meningkat. Sebaliknya, ini mencerminkan fakta bahwa ikan-ikan yang sangat muda ini belum sepenuhnya direkrut ke dalam alat tangkap. Mereka mungkin terlalu kecil untuk tertangkap oleh ukuran mata jaring atau kail (selektivitas alat tangkap), atau mereka mungkin menghuni area (misalnya, perairan yang sangat dangkal) yang tidak dijangkau oleh perikanan. Titik-titik di bagian ini tidak boleh digunakan untuk analisis mortalitas.
2. Puncak Kurva (*Peak*): Akan ada satu atau beberapa titik di puncak kurva. Ini merepresentasikan kelas-kelas umur yang pertama kali sepenuhnya

direkrut atau sepenuhnya rentan terhadap alat tangkap. Titik puncak ini biasanya juga dikecualikan dari analisis regresi.

3. Bagian Menurun (*Descending Limb*) di Sisi Kanan: Ini adalah bagian yang paling penting untuk analisis. Bagian ini terdiri dari kelas-kelas umur yang lebih tua yang semuanya diasumsikan sepenuhnya rentan terhadap alat tangkap. Titik-titik di bagian ini seharusnya membentuk garis yang menurun dan kurang lebih lurus. Garis lurus ini adalah representasi visual dari peluruhan eksponensial akibat mortalitas total.

Estimasi Z: Untuk mengestimasi Z, kita melakukan analisis regresi linier hanya pada titik-titik yang berada di bagian menurun yang lurus dari kurva hasil tangkapan.

- Kemiringan (*Slope*): Kemiringan dari garis regresi ini (b) adalah estimasi dari $-Z$.
- Koefisien Mortalitas Total (Z): Oleh karena itu, Z diestimasi sebagai nilai negatif dari kemiringan tersebut: $Z = -b$.

Contoh: Misalkan kita melakukan regresi pada bagian menurun dari kurva hasil tangkapan dan mendapatkan persamaan garis: $y = 12.5 - 0.75x$. Kemiringan (b) dari garis ini adalah -0.75 . Maka, estimasi untuk koefisien mortalitas total adalah $Z = -(-0.75) = 0.75$ per tahun.

Ini berarti bahwa populasi ikan tersebut mengalami laju mortalitas total sebesar 0.75 per tahun.

Asumsi Kunci dari Analisis Kurva Hasil Tangkapan: Keakuratan estimasi Z dari metode ini sangat bergantung pada beberapa asumsi penting:

1. Mortalitas Konstan: Koefisien mortalitas total (Z) diasumsikan konstan untuk semua kelas umur yang termasuk dalam analisis regresi (bagian menurun).
2. Rekrutmen Konstan: Kekuatan rekrutmen (jumlah ikan baru yang masuk ke populasi setiap tahun) diasumsikan relatif konstan selama beberapa tahun terakhir.
3. Dapat Ditangkap Secara Sama (*Equal Catchability*): Semua kelas umur yang termasuk dalam bagian menurun dari kurva diasumsikan memiliki

probabilitas yang sama untuk ditangkap oleh alat tangkap (yaitu, mereka sepenuhnya direkrut dan sama-sama rentan).

4. Sampel Representatif: Sampel hasil tangkapan yang dianalisis harus merupakan representasi yang tidak bias dari struktur umur populasi yang dieksploitasi.

Pelanggaran terhadap asumsi-asumsi ini dapat menyebabkan estimasi Z yang bias.

Masalah dan Bias dalam Analisis Kurva Hasil Tangkapan

Meskipun merupakan alat yang sangat berguna, analisis kurva hasil tangkapan jarang sekali sempurna karena asumsi-asumsinya sering kali dilanggar di dunia nyata. Penting untuk menyadari potensi masalah ini saat menginterpretasikan hasilnya.

1. Variabilitas Rekrutmen

Asumsi rekrutmen konstan jarang sekali terpenuhi. Sebagian besar populasi ikan menunjukkan fluktuasi rekrutmen yang tinggi dari tahun ke tahun.

- a. Dampak pada Kurva: Jika ada satu atau beberapa "angkatan" (*year class*) yang sangat kuat atau sangat lemah di masa lalu, ini akan muncul sebagai "gundukan" atau "lembah" pada bagian menurun dari kurva hasil tangkapan, menyebabkannya tidak lagi lurus.
- b. Konsekuensi: Jika fluktuasi ini diabaikan dan garis lurus dipaksakan melaluinya, estimasi kemiringan (dan dengan demikian Z) bisa menjadi sangat tidak akurat. Jika angkatan yang lebih tua dalam analisis kebetulan berasal dari rekrutmen yang sangat kuat, kemiringan akan tampak lebih landai (Z diestimasi terlalu rendah). Sebaliknya, jika mereka berasal dari rekrutmen yang lemah, kemiringan akan tampak lebih curam (Z diestimasi terlalu tinggi).
- c. Solusi: Salah satu cara untuk mengatasi ini adalah dengan menggunakan data komposisi umur dari beberapa tahun dan melakukan "analisis kohort", yaitu mengikuti kelimpahan dari setiap kohort yang sebenarnya dari waktu ke waktu. Namun, ini membutuhkan data yang jauh lebih banyak.

2. Perubahan Mortalitas atau Upaya Penangkapan

Asumsi Z konstan juga bisa menjadi masalah. Mortalitas penangkapan (F) dapat berubah dari tahun ke tahun jika upaya penangkapan meningkat atau menurun.

- Dampak pada Kurva: Jika upaya penangkapan telah meningkat secara stabil selama beberapa tahun terakhir, maka kelas-kelas umur yang lebih tua (yang mengalami F lebih rendah di masa lalu) akan relatif lebih melimpah daripada yang seharusnya. Ini akan membuat bagian menurun dari kurva menjadi cembung (melengkung ke atas) dan menyebabkan Z diestimasi terlalu rendah. Sebaliknya, jika upaya penangkapan menurun, kurva akan menjadi cekung (melengkung ke bawah) dan Z akan diestimasi terlalu tinggi.

3. Selektivitas Alat Tangkap dan Perubahan *Catchability*

- a. Selektivitas: Seperti yang telah dibahas, bagian menanjak dari kurva disebabkan oleh selektivitas alat tangkap terhadap ikan muda. Kesalahan dalam menentukan titik mana yang sudah "sepenuhnya direkrut" adalah sumber kesalahan yang umum. Jika kita secara keliru memasukkan titik-titik yang belum sepenuhnya direkrut ke dalam analisis regresi, ini akan membuat kemiringan menjadi lebih landai dan Z akan diestimasi terlalu rendah.
- b. Perubahan *Catchability* dengan Umur: Asumsi bahwa semua umur yang lebih tua memiliki *catchability* yang sama juga bisa salah. Pada beberapa spesies, ikan yang sangat tua mungkin mengubah perilaku atau habitatnya (misalnya, pindah ke perairan yang lebih dalam atau sulit dijangkau), membuat mereka kurang rentan terhadap alat tangkap. Ini akan menyebabkan kelimpahan mereka dalam hasil tangkapan tampak menurun lebih cepat daripada yang sebenarnya, yang akan mengarah pada estimasi Z yang terlalu tinggi.

Karena potensi masalah ini, penting untuk memeriksa plot kurva hasil tangkapan dengan cermat dan hanya menggunakan titik-titik yang paling jelas membentuk garis lurus untuk analisis regresi.

Kurva Hasil Tangkapan Berbasis Panjang (*Length-Converted Catch Curve*)

Salah satu tantangan terbesar dalam analisis kurva hasil tangkapan adalah kebutuhan akan data umur, yang sering kali mahal dan memakan waktu untuk diperoleh, terutama untuk ikan tropis yang sulit ditentukan umurnya. Untuk mengatasi masalah ini, sebuah metode alternatif yang cerdas dikembangkan, yang dikenal sebagai Kurva Hasil Tangkapan Berbasis Panjang (*Length-Converted Catch Curve*). Metode ini memungkinkan estimasi Z hanya dengan menggunakan data frekuensi panjang dan parameter pertumbuhan von Bertalanffy (L_{∞} dan K).

Logika Dasar: Metode ini pada dasarnya "menciptakan" sumbu umur palsu (*pseudo-age axis*) dari data panjang. Idennya adalah bahwa jika kita mengetahui bagaimana ikan tumbuh (dari parameter VBGF), kita dapat memperkirakan waktu yang dibutuhkan ikan untuk tumbuh melalui interval panjang tertentu.

1. Mengubah Panjang menjadi Umur Relatif: Persamaan VBGF dapat ditata ulang untuk menghitung umur (t) yang sesuai dengan panjang tertentu (L_t). Dengan menggunakan persamaan ini, kita dapat menghitung umur teoretis untuk batas bawah dan batas atas dari setiap kelas interval panjang dalam data frekuensi kita.
2. Menghitung Waktu Transit (Δt): Selisih antara umur teoretis di batas atas dan batas bawah dari suatu kelas panjang memberikan estimasi Δt , yaitu waktu yang dibutuhkan seekor ikan rata-rata untuk tumbuh melewati kelas panjang tersebut. Ikan yang lebih muda tumbuh cepat, sehingga Δt untuk kelas panjang yang lebih kecil akan pendek. Ikan yang lebih tua tumbuh lambat, sehingga Δt untuk kelas panjang yang lebih besar akan panjang.
3. Menyesuaikan Kelimpahan: Jumlah ikan yang diamati dalam setiap kelas panjang (NL) kemudian disesuaikan dengan membaginya dengan waktu transit (Δt). Nilai $NL/\Delta t$ ini sebanding dengan jumlah individu pada umur relatif yang sesuai. Ini karena jika ikan menghabiskan lebih banyak waktu dalam suatu kelas panjang (Δt besar), mereka akan cenderung menumpuk di sana, sehingga kelimpahannya harus dikoreksi ke bawah.

4. Plot dan Regresi: Plot dari $\ln(NL/\Delta t)$ terhadap umur relatif yang sesuai akan menghasilkan kurva hasil tangkapan yang analog dengan kurva berbasis umur. Bagian menurun dari kurva ini juga akan memiliki kemiringan yang sama dengan $-Z$.

Penerapan Praktis: Metode kurva hasil tangkapan berbasis panjang adalah salah satu alat analisis inti dalam paket perangkat lunak perikanan yang banyak digunakan seperti FISAT II (FAO-ICLARM *Stock Assessment Tools*). Perangkat lunak ini mengotomatiskan semua perhitungan yang rumit, memungkinkan peneliti untuk dengan cepat mengestimasi Z dari data frekuensi panjang, asalkan mereka memiliki estimasi awal untuk L_{∞} dan K .

Kesimpulan Akhir: Menghitung F Baik melalui kurva hasil tangkapan berbasis umur maupun berbasis panjang, tujuan akhirnya adalah untuk mendapatkan estimasi yang andal untuk Z (mortalitas total). Setelah Z diestimasi, dan dengan adanya estimasi untuk M (mortalitas alami) dari metode empiris (seperti Pauly atau Hoenig), langkah terakhir adalah menghitung parameter yang paling relevan untuk pengelolaan:

$$F=Z-M$$

Nilai F (mortalitas penangkapan) ini kemudian dapat dibandingkan dengan titik referensi biologis untuk menilai status eksploitasi stok dan memberikan nasihat pengelolaan yang berbasis ilmu pengetahuan. Dengan demikian, analisis mortalitas adalah jembatan kritis yang menghubungkan data biologis dasar dengan keputusan pengelolaan perikanan yang nyata

Sejauh ini, kita telah membedah tiga proses fundamental yang mengatur nasib individu ikan dalam suatu populasi: reproduksi (bagaimana individu baru diciptakan), pertumbuhan (bagaimana individu bertambah besar), dan mortalitas (bagaimana individu hilang dari populasi). Sekarang, kita tiba pada sebuah konsep yang mengikat semua proses ini bersama-sama dan menjadi mesin penggerak utama dari dinamika populasi perikanan: rekrutmen.

Rekrutmen adalah proses di mana individu-individu baru yang lahir dari proses reproduksi berhasil bertahan hidup melalui tahap-tahap awal kehidupan mereka yang sangat rentan dan akhirnya “masuk” atau “bergabung” dengan bagian populasi yang lebih besar. Ini adalah jembatan kritis antara satu generasi dengan generasi berikutnya. Tanpa rekrutmen yang berhasil, suatu populasi tidak dapat mempertahankan dirinya sendiri, tidak peduli seberapa cepat individu dewasanya tumbuh atau seberapa rendah laju mortalitas alaminya.

Studi tentang rekrutmen sering kali dianggap sebagai “Cawan Suci” (*Holy Grail*) dalam ilmu perikanan. Alasannya adalah karena rekrutmen merupakan proses yang paling variabel dan paling sulit diprediksi dari semua parameter dinamika populasi. Fluktuasi besar dalam keberhasilan rekrutmen dari tahun ke tahun sering kali menjadi penyebab utama dari fluktuasi dramatis dalam kelimpahan stok ikan komersial. Satu tahun dengan rekrutmen yang luar biasa kuat dapat menopang perikanan selama beberapa tahun ke depan, sementara serangkaian tahun dengan rekrutmen yang gagal dapat menyebabkan penurunan stok yang tajam, bahkan di bawah tingkat penangkapan yang sebelumnya dianggap aman.

Memahami faktor-faktor yang mengendalikan keberhasilan rekrutmen adalah tujuan utama dari banyak penelitian biologi perikanan. Jika kita

dapat memprediksi seberapa kuat rekrutmen di masa depan, kita dapat menyesuaikan tingkat penangkapan secara proaktif untuk menghindari penangkapan berlebih pada saat populasi lemah dan memanfaatkan potensi pada saat populasi kuat. Bab ini akan menyelami konsep rekrutmen, dimulai dengan definisinya yang lebih teknis dalam konteks perikanan. Selanjutnya, kita akan membahas salah satu pertanyaan paling sentral dalam ilmu perikanan: hubungan antara ukuran stok induk (pemijah) dan jumlah rekrut yang dihasilkannya. Terakhir, kita akan mengeksplorasi peran dominan dari faktor-faktor lingkungan dalam mendorong variabilitas rekrutmen yang sangat besar yang kita amati di alam.

A. Definisi Rekrutmen dalam Konteks Perikanan

Meskipun secara umum rekrutmen berarti proses penambahan individu baru ke dalam suatu populasi, dalam biologi perikanan, istilah ini memiliki beberapa definisi yang lebih spesifik tergantung pada konteksnya. Penting untuk memahami definisi mana yang sedang digunakan, karena ini akan mempengaruhi bagaimana rekrutmen diukur dan dimodelkan.

Definisi rekrutmen dapat dilihat sebagai penanda keberhasilan melewati serangkaian “gerbang” atau “rintangan” dalam tahap-tahap awal kehidupan ikan (*Early Life History Stages* - ELHS). Tahapan ini, mulai dari telur hingga menjadi yuwana, ditandai dengan laju mortalitas yang luar biasa tinggi. Dari jutaan telur yang mungkin dihasilkan oleh seekor ikan betina, hanya segelintir—atau bahkan tidak ada sama sekali—yang akan berhasil bertahan hidup hingga menjadi dewasa.

Tahapan Awal Kehidupan dan Mortalitas:

1. Tahap Telur (*Egg Stage*): Setelah pembuahan, telur ikan bersifat planktonik (melayang di kolom air) atau demersal (menempel pada substrat). Mereka menghadapi mortalitas tinggi akibat predasi oleh pemakan plankton, infeksi jamur atau bakteri, dan kondisi lingkungan yang tidak sesuai (misalnya, suhu atau kadar oksigen yang salah).
2. Tahap Larva (*Larval Stage*): Setelah menetas, larva ikan sering kali sangat berbeda dari bentuk dewasanya. Mereka memiliki cadangan kuning telur yang terbatas dan harus mulai mencari makan sendiri

dalam beberapa hari. Ini adalah periode yang sangat kritis. Larva harus menemukan mangsa (biasanya zooplankton kecil) dengan ukuran dan kepadatan yang tepat. Mortalitas pada tahap ini sangat tinggi karena kelaparan (kegagalan menemukan makanan pertama), predasi (karena ukurannya yang kecil dan kemampuan berenang yang terbatas), dan hanyut oleh arus ke area yang tidak cocok (*advection*).

3. Tahap Yuwana (*Juvenile Stage*): Setelah bermetamorfosis menjadi versi mini dari ikan dewasa, mereka disebut yuwana. Meskipun sekarang mereka adalah perenang yang lebih baik, mereka masih sangat rentan terhadap predasi karena ukurannya yang kecil. Mortalitas tetap tinggi, meskipun umumnya lebih rendah daripada tahap larva.

Rekrutmen, dalam esensinya, adalah produk akhir dari semua proses mortalitas yang terjadi selama tahapan-tahapan ini. Sedikit saja perubahan dalam laju mortalitas harian pada tahap larva dapat memiliki dampak yang sangat besar pada jumlah yuwana yang akhirnya bertahan hidup beberapa bulan kemudian.

Definisi Operasional Rekrutmen

Karena sulit untuk mengamati populasi pada tahap telur atau larva secara langsung, rekrutmen biasanya didefinisikan pada titik atau "umur" tertentu di mana individu pertama kali dapat diukur atau diamati secara andal. Definisi operasional yang umum meliputi:

1. Rekrutmen ke Populasi Yuwana: Ini adalah definisi yang paling dekat dengan konsep biologis. Rekrutmen diukur sebagai jumlah ikan yang berhasil bertahan hidup hingga tahap yuwana akhir atau saat mereka menetap (*settlement*) di habitat asuhan (misalnya, yuwana ikan karang yang menetap di terumbu karang setelah fase larva pelagis). Jumlah rekrut pada tahap ini biasanya diestimasi melalui survei ilmiah yang dirancang khusus untuk menghitung kelimpahan yuwana.
2. Rekrutmen ke Alat Tangkap (*Recruitment to the Fishery*): Ini adalah definisi yang paling umum digunakan dalam model penilaian stok konvensional. Rekrutmen didefinisikan sebagai jumlah individu dari suatu kohort yang mencapai umur atau ukuran di mana mereka pertama kali menjadi rentan untuk ditangkap oleh alat tangkap

yang digunakan dalam perikanan. Umur ini disebut umur rekrutmen (t_r). Individu yang lebih muda dari t_r dianggap memiliki mortalitas penangkapan (F) sama dengan nol. Pada umur t_r , mereka "masuk" ke dalam bagian populasi yang dieksploitasi. Nilai t_r ini bergantung pada selektivitas alat tangkap. Perikanan dengan ukuran mata jaring kecil akan memiliki t_r yang lebih muda daripada perikanan dengan ukuran mata jaring besar.

3. Rekrutmen ke Stok Pemijah (*Recruitment to the Spawning Stock*): Definisi ini berfokus pada penambahan individu baru ke dalam bagian populasi yang matang secara seksual. Rekrutmen di sini didefinisikan sebagai jumlah individu yang mencapai umur saat pertama kali matang gonad (t_m). Ini adalah definisi yang paling relevan ketika kita membahas hubungan antara ukuran stok induk dan jumlah keturunan yang dihasilkannya di generasi berikutnya.

Penting untuk selalu memperjelas definisi rekrutmen mana yang digunakan. Dalam model penilaian stok, "rekrutmen" hampir selalu mengacu pada definisi kedua (rekrutmen ke alat tangkap). Kekuatan rekrutmen (sering dilambangkan dengan R) dalam model-model ini biasanya diukur dalam jutaan atau miliaran individu yang mencapai umur t_r setiap tahun.

Hipotesis "Periode Kritis" (*Critical Period Hypothesis*)

Salah satu konsep paling berpengaruh dalam studi rekrutmen adalah Hipotesis Periode Kritis, yang pertama kali dikemukakan oleh Johan Hjort pada tahun 1914. Hjort, setelah mengamati fluktuasi besar dalam perikanan kod Norwegia, berhipotesis bahwa kekuatan suatu angkatan (year class) tidak ditentukan oleh jumlah telur yang diproduksi, melainkan oleh tingkat kelangsungan hidup selama periode yang sangat singkat dan kritis pada tahap larva.

Secara spesifik, Hjort mengusulkan bahwa periode kritis ini adalah saat transisi dari pakan endogen (mengandalkan sisa kuning telur) ke pakan eksogen (harus menangkap mangsa pertama sendiri). Ia berargumen bahwa jika larva yang baru menetas ini gagal menemukan mangsa dengan jenis, ukuran, dan kepadatan yang tepat dalam beberapa hari setelah kantung kuning telurnya habis, ia akan mati kelaparan.

Menurut hipotesis ini, keberhasilan rekrutmen secara keseluruhan ditentukan oleh kecocokan spasial dan temporal antara waktu dan lokasi pemijahan dengan siklus produksi mangsa larva (biasanya zooplankton).

1. Kecocokan (*Match*): Jika pemijahan massal terjadi tepat pada saat dan di lokasi di mana ledakan populasi (bloom) zooplankton yang cocok sedang terjadi, larva akan memiliki makanan yang melimpah. Tingkat kelangsungan hidup akan tinggi, dan hasilnya adalah rekrutmen yang kuat.
2. Ketidakcocokan (*Mismatch*): Jika karena suatu alasan (misalnya, musim semi yang lebih dingin dari biasanya menunda bloom zooplankton), pemijahan terjadi sebelum atau sesudah puncak ketersediaan makanan, sebagian besar larva akan mati kelaparan. Tingkat kelangsungan hidup akan sangat rendah, dan hasilnya adalah rekrutmen yang gagal atau sangat lemah.

Konsep "Match-Mismatch Hypothesis" ini, yang merupakan perluasan dari ide Hjort, telah menjadi kerangka kerja yang sangat dominan untuk memahami variabilitas rekrutmen, terutama di daerah beriklim sedang. Ia menyoroti betapa rentannya proses rekrutmen terhadap perubahan waktu kejadian musiman di lingkungan laut, sebuah kekhawatiran besar di era perubahan iklim. Meskipun penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa mortalitas akibat predasi juga sama pentingnya, hipotesis periode kritis tetap menjadi landasan pemikiran kita tentang betapa rapuhnya tahap awal kehidupan ikan dan mengapa rekrutmen begitu sulit diprediksi.

B. Hubungan Stok dan Rekrutmen (*Stock-Recruitment Relationship*)

Salah satu pertanyaan paling fundamental dan paling penting dalam ilmu perikanan adalah: Apakah jumlah ikan dewasa yang memijah (stok induk) mempengaruhi jumlah rekrut yang akan dihasilkan di generasi berikutnya? Secara intuitif, jawabannya tampak jelas: tentu saja. Semakin banyak induk, semakin banyak telur yang diproduksi, dan seharusnya semakin banyak rekrut yang dihasilkan. Jika tidak ada induk sama sekali, pasti tidak akan ada rekrut.

Namun, hubungan di alam ternyata jauh lebih kompleks daripada sekadar garis lurus. Meskipun benar bahwa jumlah telur total yang diproduksi (potensi reproduktif) secara umum sebanding dengan biomassa stok pemijah (*Spawning Stock Biomass* - SSB), hubungan antara SSB dan jumlah rekrut (R) yang akhirnya bertahan hidup beberapa bulan atau tahun kemudian sering kali sangat tidak jelas dan penuh dengan variasi.

Mempelajari hubungan stok-rekrutmen (*Stock-Recruitment Relationship* - S-R *relationship*) sangatlah penting. Jika kita dapat memahami bentuk hubungan ini, kita dapat:

1. Menentukan Titik Referensi Biologis: Mengidentifikasi tingkat SSB di mana rekrutmen mulai menurun secara signifikan (risiko kegagalan rekrutmen). Ini membantu dalam menetapkan batas-batas pengelolaan untuk menjaga stok induk pada tingkat yang aman.
2. Memprediksi Rekrutmen Masa Depan: Meskipun sulit, model S-R adalah alat utama yang kita miliki untuk mencoba memprediksi kekuatan rekrutmen di masa depan berdasarkan ukuran stok saat ini.
3. Memahami Produktivitas Stok: Bentuk kurva S-R memberitahu kita tentang ketahanan (*resilience*) suatu stok terhadap penangkapan.

Data untuk analisis S-R terdiri dari serangkaian data pasangan waktu (*time series*) dari estimasi SSB dan estimasi R yang disesuaikan untuk periode bertahun-tahun. Plot sebar (*scatter plot*) dari R terhadap SSB biasanya menunjukkan awan titik yang sangat menyebar, yang menyoroti betapa besarnya variasi dalam rekrutmen yang tidak dapat dijelaskan oleh ukuran stok induk saja. Meskipun demikian, di tengah "kebisingan" (variasi) ini, para ilmuwan mencoba untuk menemukan sinyal atau pola dasar yang mendasarinya.

Pola dasar yang diharapkan adalah bahwa pada tingkat stok induk yang sangat rendah, rekrutmen akan meningkat seiring dengan meningkatnya stok. Namun, pada tingkat stok yang lebih tinggi, hubungan ini menjadi tidak linier. Rekrutmen tidak terus meningkat tanpa batas, melainkan akan melandai atau bahkan menurun. Fenomena ini disebabkan oleh proses-proses yang bergantung pada kepadatan (*density-dependent processes*).

Mekanisme yang Bergantung pada Kepadatan (*Density-Dependence*)

Proses yang bergantung pada kepadatan adalah mekanisme ekologis di mana laju pertumbuhan atau kelangsungan hidup per kapita suatu populasi menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan populasi tersebut. Dalam konteks rekrutmen, ini berarti bahwa ketika jumlah telur atau larva sangat tinggi, tingkat kelangsungan hidup setiap individu telur atau larva justru menurun. Mekanisme ini mencegah populasi tumbuh tanpa batas dan merupakan dasar dari sebagian besar model S-R. Beberapa mekanisme yang bergantung pada kepadatan yang utama meliputi:

1. Keterbatasan Sumber Daya Makanan (*Competition for Food*): Jika jumlah larva yang menetas sangat besar, mereka akan saling bersaing untuk mendapatkan sumber daya makanan (zooplankton) yang terbatas. Persaingan yang ketat ini dapat menyebabkan pertumbuhan yang lebih lambat dan peningkatan kematian akibat kelaparan. Akibatnya, meskipun telur yang dihasilkan dua kali lebih banyak, jumlah rekrut yang bertahan hidup mungkin tidak menjadi dua kali lipat karena tingkat kelangsungan hidup per kapita menurun.
2. Kanibalisme (*Cannibalism*): Pada banyak spesies ikan, individu yang lebih tua atau lebih besar akan memangsa individu yang lebih muda dari spesies mereka sendiri. Ketika kepadatan stok induk sangat tinggi, kemungkinan yuwana atau bahkan larva dimangsa oleh ikan dewasa dari generasi sebelumnya akan meningkat. Ini adalah bentuk regulasi populasi yang sangat langsung.
3. Peningkatan Tekanan Predator (*Predator Aggregation*): Kepadatan telur atau larva yang sangat tinggi di suatu area dapat menarik predator. Predator mungkin akan berkumpul di area tersebut dan meningkatkan tingkat konsumsi mereka (respons fungsional) atau populasi predator itu sendiri mungkin akan meningkat dari waktu ke waktu sebagai respons terhadap sumber makanan yang melimpah (respons numerik). Akibatnya, proporsi larva yang dimangsa akan lebih tinggi pada kepadatan larva yang tinggi.
4. Keterbatasan Habitat Asuhan yang Cocok (*Limited Nursery Habitat*): Banyak spesies ikan bergantung pada habitat spesifik sebagai area asuhan bagi yuwana mereka (misalnya, padang lamun, hutan bakau,

atau terumbu karang). Jumlah ruang atau "tempat" yang aman di habitat ini terbatas. Ketika jumlah yuwana yang mencoba menetap sangat tinggi, akan terjadi persaingan ketat untuk mendapatkan ruang. Individu yang tidak mendapatkan tempat yang cocok akan lebih rentan terhadap predasi. Ini menciptakan efek "langit-langit" (ceiling) pada jumlah rekrut yang dapat ditampung oleh suatu habitat.

Proses-proses inilah yang menyebabkan kurva S-R membengkok dan melandai pada tingkat stok yang tinggi. Kemampuan suatu populasi untuk menghasilkan lebih banyak rekrut per pemijah pada saat kepadatannya rendah adalah inti dari kompensasi (*compensation*). Kompensasi adalah mekanisme yang memungkinkan populasi untuk pulih dari tingkat eksploitasi yang sedang. Namun, jika stok ditekan hingga tingkat yang sangat rendah, kemampuan kompensasi ini dapat hilang, dan rekrutmen akan menurun secara proporsional dengan stok, yang mengarah pada risiko kolaps.

1. Pengenalan Model *Beverton-Holt* dan *Ricker*

Untuk menggambarkan secara matematis hubungan yang bergantung pada kepadatan antara stok dan rekrutmen, dua model klasik telah mendominasi literatur perikanan selama lebih dari setengah abad. Keduanya dinamai sesuai dengan para ilmuwan perikanan brilian yang mengembangkannya: model *Beverton-Holt* dan model *Ricker*. Kedua model ini adalah cara yang berbeda untuk memformulasikan bagaimana tingkat kelangsungan hidup awal menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan stok awal.

Meskipun keduanya menggambarkan kompensasi, mereka berbeda dalam bentuk kurva dan asumsi biologis yang mendasarinya. Pilihan antara kedua model ini sering kali bergantung pada data yang tersedia dan pemahaman tentang mekanisme *density-dependence* yang paling mungkin bekerja pada spesies yang diteliti.

Model *Beverton-Holt*

Model ini dikembangkan oleh Ray *Beverton* dan *Sidney Holt* pada tahun 1957 sebagai bagian dari karya monumental mereka tentang dinamika populasi ikan.

Asumsi Biologis: Model Beverton-Holt paling sesuai untuk menggambarkan situasi di mana mekanisme yang bergantung pada kepadatan terjadi karena persaingan untuk sumber daya yang terbatas, seperti makanan atau ruang di habitat asuhan. Model ini mengasumsikan bahwa ada kapasitas tampung (*carrying capacity*) yang terbatas untuk larva atau yuwana. Begitu kepadatan mencapai tingkat tertentu, kompetisi akan meningkat, dan tingkat kelangsungan hidup akan menurun. Namun, model ini tidak memasukkan efek kanibalisme atau kompetisi yang sangat parah yang dapat menyebabkan jumlah rekrut total menurun pada kepadatan yang sangat tinggi.

Bentuk Persamaan: Persamaan untuk model Beverton-Holt adalah:

$$R = 1 + \beta S \alpha S$$

dimana:

- a. R adalah jumlah rekrut.
- b. S adalah ukuran stok pemijah (SSB).
- c. alpha (alpha) adalah parameter yang merepresentasikan produktivitas pada kepadatan stok yang sangat rendah. Secara spesifik, alpha adalah jumlah rekrut yang dihasilkan per unit stok pemijah saat S mendekati nol. Ini adalah kemiringan kurva di titik awal (origin) dan merupakan ukuran dari potensi reproduktif maksimum per kapita.
- d. beta (beta) adalah parameter yang berhubungan dengan tingkat kepadatan-dependensi. Semakin besar nilai beta, semakin kuat efek kompensasi. Parameter ini terkait dengan tingkat rekrutmen maksimum.

Bentuk Kurva dan Interpretasi: Kurva Beverton-Holt memiliki bentuk asimtotik.

- a. Pada tingkat stok (S) yang rendah, istilah βS di penyebut sangat kecil, sehingga persamaan menjadi kira-kira $R \approx \alpha S$. Ini berarti rekrutmen meningkat secara linier dengan stok.
- b. Seiring dengan meningkatnya S, istilah βS menjadi semakin dominan. Ini menyebabkan kurva melandai secara progresif.
- c. Pada tingkat stok yang sangat tinggi, kurva mendekati sebuah asimtot, yaitu tingkat rekrutmen maksimum yang mungkin terjadi. Asimtot ini

diberikan oleh nilai $1/\beta$. Ini berarti bahwa tidak peduli seberapa besar stok induknya, jumlah rekrut tidak akan pernah bisa melebihi tingkat maksimum ini, yang ditentukan oleh kapasitas tampung lingkungan.

Kurva Beverton-Holt tidak pernah menurun. Ini menyiratkan bahwa bahkan pada kepadatan stok induk yang sangat tinggi sekalipun, jumlah rekrut total tidak akan berkurang. Model ini cocok untuk spesies di mana kanibalisme oleh induk terhadap keturunannya tidak signifikan.

Model Ricker

Model ini dikembangkan oleh William (Bill) Ricker pada tahun 1954, terutama dari hasil studinya pada populasi salmon.

Asumsi Biologis: Model Ricker paling sesuai untuk menggambarkan situasi di mana mekanisme yang bergantung pada kepadatan bersifat overkompensasi. Ini berarti bahwa pada tingkat kepadatan stok yang sangat tinggi, persaingan atau interaksi negatif menjadi begitu parah sehingga menyebabkan jumlah total rekrut yang bertahan hidup justru menurun. Mekanisme biologis yang paling sering dikaitkan dengan model Ricker adalah:

- a. Kanibalisme: Ketika stok induk sangat padat, mereka mungkin akan memakan sejumlah besar keturunan mereka sendiri (telur atau yuana), sehingga mengurangi jumlah rekrut total.
- b. Kompetisi Perebutan (*Scramble Competition*): Jika kepadatan larva sangat tinggi dan sumber makanan sangat terbatas, persaingan bisa menjadi sangat ekstrem sehingga tidak ada individu yang mendapatkan cukup makanan untuk bertahan hidup, yang menyebabkan kematian massal.
- c. Penumpukan Limbah Metabolik: Di area pemijahan yang padat, penumpukan limbah dapat menurunkan kualitas air dan meningkatkan mortalitas.

Bentuk Persamaan: Persamaan untuk model Ricker adalah:

$$R = \alpha S e^{-\beta S}$$

dimana:

- a. R adalah jumlah rekrut.
- b. S adalah ukuran stok pemijah (SSB).
- c. alpha (alpha) memiliki interpretasi yang sama seperti pada model Beverton-Holt: produktivitas pada kepadatan rendah atau kemiringan kurva di titik awal.
- d. beta (beta) adalah parameter yang mengukur kekuatan dari efek overkompensasi yang bergantung pada kepadatan.
- e. e adalah basis logaritma natural.

Bentuk Kurva dan Interpretasi: Kurva Ricker memiliki bentuk kubah (*dome-shaped*).

- a. Pada tingkat stok (S) yang rendah, istilah eksponensial $e^{-\beta S}$ mendekati 1, sehingga persamaan menjadi kira-kira $R \approx \alpha S$. Sama seperti Beverton-Holt, rekrutmen meningkat secara linier pada awalnya.
- b. Seiring dengan meningkatnya S, kurva terus menanjak tetapi dengan laju yang melambat, hingga mencapai puncak pada tingkat stok tertentu. Ini adalah titik di mana jumlah rekrutmen adalah maksimum.
- c. Setelah melewati puncak, jika S terus meningkat, istilah eksponensial negatif ($e^{-\beta S}$) menjadi sangat kuat. Ini menyebabkan kurva menurun kembali. Ini merepresentasikan fenomena overkompensasi, di mana stok induk yang terlalu besar justru menghasilkan lebih sedikit rekrut yang bertahan hidup dibandingkan stok dengan ukuran sedang.

Kurva Ricker cocok untuk spesies seperti salmon, di mana kepadatan pemijah yang sangat tinggi di sungai dapat menyebabkan kompetisi perebutan untuk area pemijahan yang terbatas atau memicu kanibalisme.

Membedingkan Beverton-Holt dan Ricker

Fitur	Model Beverton-Holt	Model Ricker
Bentuk Kurva	Asimtotik (melandai ke tingkat maksimum)	Berbentuk Kubah (naik ke puncak lalu turun)
Rekrutmen Maksimum	Terjadi pada kepadatan stok tak terhingga (<i>Stoinfty</i>)	Terjadi pada kepadatan stok menengah

Fitur	Model Beverton-Holt	Model Ricker
Overkompensasi	Tidak ada (kompensasi saja)	Ada (overkompensasi pada S tinggi)
Mekanisme Biologis Utama	Kompetisi untuk sumber daya terbatas (makanan, ruang)	Kanibalisme, kompetisi perebutan, efek kepadatan yang parah
Contoh Spesies	Ikan demersal laut seperti plaice atau cod	Ikan anadromus seperti salmon, ikan pelagis seperti herring
Persamaan	$R = \frac{r}{\alpha} S + \beta S$	$R = \alpha S e^{-\beta S}$

Tantangan dalam Pemasangan Model S-R

Meskipun model-model ini secara teoritis elegan, memasangkannya (*fitting*) pada data S-R di dunia nyata sangatlah menantang. Seperti yang telah disebutkan, plot data S-R biasanya menunjukkan variasi yang sangat besar ("kebisingan").

- Variasi Lingkungan: Sebagian besar variasi ini disebabkan oleh fluktuasi faktor lingkungan (suhu, arus, ketersediaan makanan predator) yang mempengaruhi kelangsungan hidup larva, yang sama sekali tidak bergantung pada ukuran stok induk.
- Kesalahan Pengukuran: Estimasi SSB dan R itu sendiri memiliki ketidakpastian dan kesalahan pengukuran yang signifikan.

Akibatnya, sering kali sulit untuk menentukan secara statistik model mana (*Beverton-Holt* atau *Ricker*) yang paling cocok untuk suatu set data, atau bahkan untuk mendeteksi hubungan S-R yang signifikan sama sekali. Parameter alpha dan beta yang diestimasi sering kali memiliki interval kepercayaan yang sangat lebar.

Karena ketidakpastian yang tinggi ini, penggunaan kurva S-R untuk membuat prediksi rekrutmen dari tahun ke tahun harus dilakukan dengan sangat hati-hati. Namun, model-model ini tetap sangat berharga untuk tujuan strategis: yaitu untuk memahami bentuk umum dari hubungan tersebut dan untuk mengidentifikasi titik referensi batas (*limit reference points*). Misalnya, model S-R dapat membantu kita mengestimasi tingkat

SSB di bawah mana rekrutmen diperkirakan akan menurun tajam, yang berfungsi sebagai ambang batas yang harus dihindari oleh pengelolaan.

2. Konsep Rekrutmen Berlebih (*Over-recruitment*)

Istilah “rekrutmen berlebih” atau *over-recruitment* mungkin terdengar kontradiktif. Bukankah memiliki banyak rekrut selalu merupakan hal yang baik untuk suatu populasi? Namun, dalam beberapa konteks ekologis, ledakan rekrutmen yang luar biasa kuat dapat memiliki konsekuensi negatif pada populasi itu sendiri di tahun-tahun berikutnya. Fenomena ini terkait erat dengan proses yang bergantung pada kepadatan.

Konsep rekrutmen berlebih dapat merujuk pada dua hal:

- a. Overkompensasi dalam Model Ricker: Seperti yang telah dibahas, model Ricker secara eksplisit menggambarkan situasi di mana stok induk yang terlalu besar menghasilkan rekrut yang lebih sedikit. Namun, istilah rekrutmen berlebih lebih sering digunakan untuk menggambarkan dampak dari angkatan (*year class*) yang sangat kuat pada dirinya sendiri dan pada angkatan berikutnya.
- b. Dampak Negatif dari Angkatan yang Sangat Padat: Bayangkan satu tahun di mana kondisi lingkungan sangat ideal dan menghasilkan jumlah rekrut yang luar biasa besar—sebuah “angkatan super”. Ketika angkatan yang sangat padat ini tumbuh, mereka dapat menciptakan persaingan intraspesifik (kompetisi di antara anggota spesies yang sama) yang sangat hebat.
 - 1) Pertumbuhan yang Melambat: Karena persaingan yang ketat untuk mendapatkan makanan, laju pertumbuhan individu dalam angkatan yang padat ini bisa menjadi jauh lebih lambat daripada biasanya. Mereka mungkin membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai ukuran matang atau ukuran layak tangkap. Fenomena ini, di mana pertumbuhan bergantung pada kepadatan, telah didokumentasikan dengan baik pada banyak spesies.
 - 2) Penurunan Kondisi dan Fekunditas: Individu dalam angkatan yang padat mungkin berada dalam kondisi tubuh yang lebih buruk (faktor kondisi rendah) dan menghasilkan lebih sedikit telur per individu ketika mereka akhirnya matang.

- 3) Kanibalisme terhadap Angkatan Berikutnya: Ketika angkatan super ini menjadi dewasa, ukurannya yang besar dan jumlahnya yang melimpah dapat menciptakan tekanan kanibalisme yang sangat tinggi pada angkatan-angkatan yang lebih muda yang datang setelahnya. Akibatnya, satu angkatan yang sangat kuat dapat menekan atau menghambat keberhasilan rekrutmen selama beberapa tahun berikutnya.

Dalam skenario ini, ledakan rekrutmen awal dapat menyebabkan "kemacetan" populasi, di mana sejumlah besar individu yang tumbuh lambat dan dalam kondisi buruk mendominasi stok. Ini dapat menyebabkan fluktuasi siklus dalam populasi, di mana periode rekrutmen tinggi diikuti oleh periode rekrutmen rendah yang disebabkan oleh efek kepadatan dari angkatan yang kuat sebelumnya.

Memahami potensi rekrutmen berlebih dan dampaknya terhadap pertumbuhan adalah penting untuk interpretasi data perikanan. Misalnya, jika seorang manajer mengamati bahwa ukuran rata-rata ikan dalam hasil tangkapan menurun, ini tidak selalu berarti terjadi penangkapan berlebih. Ini bisa jadi merupakan hasil dari masuknya angkatan yang sangat kuat dan padat ke dalam perikanan, yang terdiri dari individu-individu yang tumbuh lebih lambat dari biasanya. Analisis yang cermat terhadap data umur dan pertumbuhan diperlukan untuk membedakan antara kedua skenario ini.

C. Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Keberhasilan Rekrutmen

Meskipun model stok-rekrutmen seperti Beverton-Holt dan Ricker menyediakan kerangka kerja teoretis yang penting, dalam praktiknya, plot data S-R hampir selalu menunjukkan sebaran titik yang sangat lebar. "Kebisingan" atau variasi yang sangat besar ini adalah bukti nyata bahwa ukuran stok induk sering kali bukan merupakan faktor penentu utama dari kekuatan rekrutmen dari tahun ke tahun. Sebaliknya, sebagian besar variabilitas dalam rekrutmen ikan laut diyakini didorong oleh faktor-faktor lingkungan yang bekerja secara independen dari kepadatan stok.

Faktor-faktor lingkungan ini mempengaruhi kelangsungan hidup pada tahap-tahap awal kehidupan ikan (telur, larva, dan yuwana awal) yang sangat rentan. Sedikit saja perubahan dalam kondisi oseanografi atau iklim dapat menyebabkan perbedaan besar dalam tingkat mortalitas pada tahap-tahap ini, yang kemudian diperkuat menjadi fluktuasi rekrutmen yang dramatis. Memahami hubungan antara lingkungan dan rekrutmen adalah salah satu bidang penelitian paling aktif dan paling menantang dalam ilmu perikanan, terutama di era perubahan iklim global.

Hubungan antara lingkungan dan rekrutmen bekerja melalui tiga mekanisme utama yang saling terkait, yang sering disebut sebagai "Triad Fundamental" dari Cushing (1990):

1. Ketersediaan Makanan (*Enrichment*): Apakah ada cukup makanan yang tepat untuk larva?
2. Konsentrasi Makanan (*Concentration*): Apakah makanan terkonsentrasi di area yang sama dengan larva sehingga mudah ditemukan?
3. Retensi (*Retention*): Apakah larva dan makanannya tertahan di dalam area yang cocok untuk pertumbuhan dan tidak hanyut ke lingkungan yang tidak menguntungkan?

Semua mekanisme ini sangat dipengaruhi oleh variabel-variabel oseanografi fisik seperti suhu, angin, dan arus.

1. Suhu Laut (*Sea Temperature*)

Suhu adalah variabel lingkungan utama (*master variable*) yang mempengaruhi hampir semua proses biologis pada ikan.

- a. Pengaruh terhadap Laju Perkembangan: Suhu secara langsung mengontrol laju metabolisme dan perkembangan. Suhu yang lebih hangat akan mempercepat waktu penetasan telur dan laju pertumbuhan larva. Pertumbuhan yang lebih cepat dapat mengurangi durasi tahap larva yang rentan, yang berpotensi meningkatkan kelangsungan hidup (hipotesis "semakin besar, semakin baik" atau *bigger is better*). Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat melampaui batas toleransi fisiologis dan menyebabkan kematian.

- b. Pengaruh terhadap Waktu Pemijahan dan Produksi Makanan: Seperti yang dibahas dalam hipotesis *match-mismatch*, suhu sering kali menjadi pemicu waktu pemijahan induk dan juga waktu terjadinya ledakan populasi (*bloom*) fitoplankton dan zooplankton. Perubahan suhu dari tahun ke tahun dapat mengganggu sinkronisasi waktu antara keberadaan larva dan ketersediaan mangsa puncaknya, yang menyebabkan kegagalan rekrutmen.
- c. Pengaruh terhadap Distribusi: Suhu juga menentukan distribusi geografis dari stok ikan dan mangsanya. Pemanasan laut dapat menyebabkan pergeseran habitat pemijahan ke arah kutub, yang mungkin menempatkan larva di rezim arus atau lingkungan pakan yang sama sekali baru.

2. Angin dan Turbulensi (*Wind and Turbulence*)

Angin adalah penggerak utama dari banyak proses di lapisan permukaan laut.

- a. Hipotesis "Jendela Lingkungan Optimal" (*Optimal Environmental Window*): Andrew Bakun (1996) mengusulkan bahwa hubungan antara intensitas pencampuran yang didorong oleh angin dan kelangsungan hidup larva tidaklah linier, melainkan berbentuk kubah.
 - 1) Angin Terlalu Lemah: Kondisi yang terlalu tenang dapat menyebabkan stratifikasi kolom air yang kuat. Ini menghambat pasokan nutrisi dari lapisan dalam ke permukaan, sehingga produksi primer (fitoplankton) menjadi rendah. Akibatnya, makanan untuk larva menjadi langka.
 - 2) Angin Terlalu Kuat: Kondisi yang terlalu bergejolak (turbulensi tinggi) dapat membubarkan "petak-petak" konsentrasi makanan dan larva. Energi yang dibutuhkan larva untuk mengejar mangsa yang tersebar menjadi terlalu besar. Turbulensi fisik yang ekstrem juga dapat secara langsung merusak larva yang rapuh.
 - 3) Kondisi Optimal: Keberhasilan rekrutmen tertinggi terjadi pada tingkat pencampuran angin yang menengah, yang cukup kuat untuk memasok nutrisi dan menopang produksi primer, tetapi tidak terlalu kuat sehingga membubarkan konsentrasi makanan.

3. **Transportasi dan Retensi oleh Arus (*Current Transport and Retention*)**

Banyak spesies ikan memijah di lokasi tertentu di mana arus laut yang dominan diharapkan akan membawa telur dan larva mereka ke area asuhan (*nursery grounds*) yang cocok.

- a. Pentingnya Retensi: Keberhasilan rekrutmen sering kali bergantung pada apakah larva tertahan (*retained*) di dalam sistem pesisir yang produktif atau terbawa (*advected*) ke lautan terbuka yang tidak cocok. Fitur-fitur oseanografi seperti *gyre* (pusaran air), *eddy* (pusaran kecil), atau front dapat berfungsi sebagai mekanisme retensi yang menahan larva dan makanannya di satu area.
- b. Contoh: Di banyak sistem *upwelling* pesisir (seperti di lepas pantai Peru atau California), angin yang kuat mendorong air permukaan ke lepas pantai, yang menyebabkan naiknya air dingin yang kaya nutrisi. Ini menciptakan produktivitas yang sangat tinggi. Namun, proses yang sama ini juga dapat membawa larva ikan menjauh dari pantai ke lingkungan lepas pantai yang tidak menguntungkan. Rekrutmen yang berhasil di sistem ini sering kali bergantung pada periode relaksasi angin atau adanya fitur arus balik yang menahan sebagian larva di dekat pantai.

4. **Indeks Iklim Skala Besar (*Large-Scale Climate Indices*)**

Fluktuasi lingkungan laut sering kali merupakan bagian dari pola iklim skala besar yang beroperasi di seluruh cekungan samudra. Oleh karena itu, para ilmuwan sering menemukan korelasi yang kuat antara keberhasilan rekrutmen suatu stok ikan dengan berbagai indeks iklim. Indeks-indeks ini adalah ukuran sederhana dari kondisi iklim skala besar.

- a. El Niño-Southern Oscillation (ENSO): Ini adalah pola iklim yang paling terkenal, yang berpusat di Samudra Pasifik tropis. Selama fase El Niño (fase hangat), massa air hangat menyebar ke seluruh Pasifik timur, menekan termoklin, dan mematikan proses *upwelling* di lepas pantai Peru dan Ekuador. Hal ini menyebabkan penurunan drastis dalam produktivitas primer, yang memicu keruntuhan populasi zooplankton dan kegagalan rekrutmen besar-besaran pada ikan teri

peru (*anchoveta*). Sebaliknya, fase La Niña (fase dingin) sering kali dikaitkan dengan *upwelling* yang kuat dan rekrutmen yang baik.

- b. Pacific Decadal Oscillation (PDO) dan North Atlantic Oscillation (NAO): Ini adalah pola fluktuasi iklim jangka panjang lainnya (berlangsung selama beberapa dekade) yang mempengaruhi suhu laut, pola angin, dan arus di Samudra Pasifik Utara dan Atlantik Utara. Pergeseran fase dalam PDO atau NAO telah terbukti berkorelasi kuat dengan perubahan rezim dalam produktivitas dan rekrutmen banyak stok ikan komersial penting, seperti salmon dan kod.

Meskipun korelasi dengan indeks iklim ini bisa sangat kuat dan berguna untuk peramalan, penting untuk diingat bahwa korelasi tidak sama dengan sebab-akibat. Indeks iklim adalah proksi untuk serangkaian perubahan fisik yang kompleks. Penelitian yang sebenarnya bertujuan untuk memahami mekanisme fisik dan biologis spesifik (misalnya, perubahan arus yang mempengaruhi transportasi larva) yang menghubungkan indeks iklim skala besar dengan respons rekrutmen lokal.

Kesimpulan Rekrutmen adalah hasil dari interaksi yang sangat kompleks antara biologi reproduksi stok induk dan serangkaian faktor lingkungan yang sangat bervariasi. Ketidakmampuan kita untuk memprediksi rekrutmen dengan akurasi tinggi adalah sumber ketidakpastian terbesar dalam pengelolaan perikanan. Hal ini menggarisbawahi pentingnya pendekatan kehati-hatian (*precautionary approach*). Karena kita tidak dapat memprediksi rekrutmen di masa depan, cara teraman untuk memastikan kelestarian stok adalah dengan menjaga biomassa stok pemijah (SSB) pada tingkat yang cukup sehat. Stok pemijah yang sehat mungkin tidak menjamin rekrutmen yang baik setiap tahun (karena lingkungan bisa jadi tidak mendukung), tetapi ia memberikan "asuransi" biologis terbaik untuk dapat menghasilkan rekrutmen yang kuat ketika kondisi lingkungan yang menguntungkan akhirnya tiba.

Kita sekarang tiba di puncak dari semua topik yang telah kita bahas sejauh ini. Reproduksi, pertumbuhan, mortalitas, dan rekrutmen adalah potongan-potongan puzzle biologis. Pendugaan stok (*stock assessment*) adalah proses di mana kita menyatukan semua potongan puzzle tersebut ke dalam sebuah kerangka kerja kuantitatif yang koheren untuk mengevaluasi kondisi suatu sumber daya perikanan dan memberikan nasihat ilmiah untuk pengelolaannya.

Pendugaan stok adalah jantung dari ilmu perikanan kuantitatif. Ini adalah proses formal untuk mengumpulkan, menganalisis, dan mensintesis data biologis dan data perikanan untuk menghasilkan gambaran tentang status stok saat ini dan memprediksi bagaimana stok akan merespons berbagai skenario pengelolaan di masa depan. Ini adalah jembatan antara ilmu pengetahuan dan kebijakan. Tanpa pendugaan stok, pengelolaan perikanan akan menjadi tebak-tebakan yang tidak terinformasi.

Proses ini sering kali kompleks, intensif data, dan penuh dengan ketidakpastian. Namun, tujuannya sederhana dan sangat penting: untuk menjawab serangkaian pertanyaan kunci yang dihadapi oleh setiap manajer perikanan:

1. Seberapa banyak ikan yang ada? (Estimasi kelimpahan atau biomassa stok).
2. Apakah stok sedang ditangkap secara berlebihan? (Membandingkan laju mortalitas penangkapan saat ini dengan titik referensi target).
3. Apakah stok berada pada tingkat yang sehat? (Membandingkan biomassa saat ini dengan titik referensi batas).
4. Berapa banyak ikan yang dapat kita tangkap secara berkelanjutan? (Menentukan hasil tangkapan yang diizinkan atau *Total Allowable Catch* - TAC).

Bab ini akan memberikan pengantar tentang prinsip-prinsip dasar dan tujuan dari pendugaan stok. Kita akan menjelajahi dua keluarga utama dari model pendugaan stok: model produksi surplus (holistik), yang memperlakukan seluruh biomassa stok sebagai satu unit, dan model analitik (berstruktur umur), yang secara eksplisit memodelkan nasib setiap kohort dalam populasi. Memahami perbedaan, kekuatan, dan kelemahan dari kedua pendekatan ini sangat penting bagi setiap praktisi biologi perikanan.

A. Tujuan dan Prinsip Dasar Pendugaan Stok

Tujuan Utama Pendugaan Stok

Tujuan akhir dari setiap kegiatan pendugaan stok adalah untuk menyediakan nasihat ilmiah (*scientific advice*) yang tepat waktu, relevan, dan dapat dipahami kepada para pengambil keputusan (manajer perikanan). Nasihat ini bukanlah keputusan itu sendiri; keputusan akhir sering kali melibatkan pertimbangan sosial, ekonomi, dan politik. Namun, nasihat ilmiah yang kuat berfungsi sebagai fondasi di mana keputusan yang bertanggung jawab dapat dibangun.

Secara lebih spesifik, tujuan dari proses pendugaan stok meliputi:

1. Menilai Status Stok: Ini adalah tujuan diagnostik. Seperti seorang dokter yang memeriksa pasien, seorang ilmuwan pendugaan stok "mendiagnosis" kesehatan suatu populasi ikan. Ini melibatkan estimasi indikator status stok, seperti:
 - a. Biomassa saat ini ($B_{current}$): Berapa banyak ikan (dalam ton) yang ada saat ini.
 - b. Mortalitas penangkapan saat ini ($F_{current}$): Seberapa besar tekanan penangkapan yang dialami stok saat ini.
 - c. Titik Referensi (*Reference Points*): Menentukan tolok ukur untuk perbandingan, seperti biomassa yang menghasilkan hasil tangkapan maksimum lestari (BMSY) dan mortalitas penangkapan yang menghasilkannya (FMSY).
 - d. Evaluasi Status: Membandingkan indikator saat ini dengan titik referensi (misalnya, membandingkan $B_{current}$ dengan BMSY, dan

Fcurrent dengan FMSY) untuk menentukan apakah stok berada dalam kondisi penangkapan berlebih (overfishing is occurring) dan/atau dalam kondisi telah ditangkap berlebih (overfished).

2. Membuat Proyeksi Jangka Pendek dan Jangka Panjang: Ini adalah tujuan prognostik. Berdasarkan pemahaman tentang status stok saat ini dan dinamikanya, model dapat digunakan untuk memproyeksikan apa yang akan terjadi di masa depan di bawah berbagai opsi kebijakan. Misalnya:
 - a. "Jika kita mempertahankan tingkat penangkapan saat ini, apa yang akan terjadi pada biomassa stok dalam 5 tahun ke depan?"
 - b. "Berapa besar TAC yang harus kita tetapkan untuk tahun depan agar memiliki probabilitas 50% untuk membangun kembali stok ke tingkat BMSY dalam 10 tahun?"
 - c. "Apa dampak dari penerapan peraturan ukuran tangkap minimum yang baru terhadap hasil tangkapan jangka panjang?"
3. Mengevaluasi Kinerja Strategi Pengelolaan: Pendugaan stok juga dapat digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan berbagai strategi pengelolaan jangka panjang (*Management Strategy Evaluation - MSE*). Ini melibatkan simulasi seluruh sistem perikanan (termasuk biologi stok, perilaku armada, proses penilaian, dan aturan keputusan) untuk melihat strategi mana yang paling kuat dalam mencapai tujuan pengelolaan (misalnya, memaksimalkan hasil tangkapan sambil menjaga risiko kolaps tetap rendah) dalam menghadapi ketidakpastian.

Prinsip-prinsip Dasar dalam Pendugaan Stok

Proses pendugaan stok yang baik dipandu oleh beberapa prinsip dasar yang penting.

1. Kebutuhan Data (*Data Requirements*) Pendugaan stok adalah proses yang sangat bergantung pada data. Kualitas dan keandalan output dari model secara langsung bergantung pada kualitas dan kuantitas data yang dimasukkan. "Sampah masuk, sampah keluar" (garbage in, garbage out) adalah pepatah yang sangat relevan di sini. Data yang dibutuhkan dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama:

- a. Data yang Bergantung pada Perikanan (*Fishery-Dependent Data*): Ini adalah data yang dikumpulkan dari aktivitas perikanan komersial atau rekreasi.
 - 1) Total Hasil Tangkapan (*Total Catch*): Informasi paling fundamental. Berapa total berat ikan (termasuk yang didaratkan dan yang dibuang di laut) yang diambil dari stok setiap tahun.
 - 2) Upaya Penangkapan (*Fishing Effort*): Ukuran dari total intensitas penangkapan (misalnya, jumlah hari melaut, jumlah jam menarik pukat, jumlah kail yang dipasang).
 - 3) Data Biologis dari Hasil Tangkapan: Sampel dari hasil tangkapan untuk menentukan distribusi panjang, distribusi umur, jenis kelamin, dan kematangan gonad.
- b. Data yang Tidak Bergantung pada Perikanan (*Fishery-Independent Data*): Ini adalah data yang dikumpulkan dari survei ilmiah yang dirancang secara khusus, yang tidak bergantung pada aktivitas armada komersial.
 - 1) Indeks Kelimpahan Relatif: Hasil dari survei (misalnya, survei pukat ilmiah atau survei akustik) yang memberikan indeks kelimpahan yang terstandarisasi dan tidak bias dari tahun ke tahun.
 - 2) Data Biologis dari Survei: Sampel yang dikumpulkan selama survei untuk mendapatkan data biologis yang representatif dari seluruh populasi (bukan hanya bagian yang ditangkap oleh perikanan).

Data yang tidak bergantung pada perikanan sangat berharga karena mereka tidak terpengaruh oleh perubahan dalam perilaku nelayan atau efisiensi penangkapan, dan sering kali memberikan gambaran yang lebih tidak bias tentang tren populasi.

2. Pemilihan Model yang Tepat Tidak ada satu model pendugaan stok pun yang cocok untuk semua situasi. Pemilihan model yang tepat bergantung pada beberapa faktor:
 - a. Tujuan Penilaian: Pertanyaan spesifik apa yang ingin dijawab?
 - b. Ketersediaan Data: Ini adalah faktor pembatas utama. Model yang kompleks (seperti model berstruktur umur) membutuhkan data yang sangat detail (misalnya, data tangkapan per umur). Jika

data yang tersedia hanya data total hasil tangkapan dan upaya, maka hanya model yang lebih sederhana (seperti model produksi surplus) yang dapat digunakan.

- c. Biologi Spesies: Karakteristik sejarah kehidupan spesies (misalnya, apakah umurnya mudah ditentukan?) juga mempengaruhi pilihan model.
3. Pengakuan dan Penanganan Ketidakpastian (*Dealing with Uncertainty*)
- Pendugaan stok modern secara eksplisit mengakui bahwa proses ini penuh dengan ketidakpastian. Ketidakpastian dapat berasal dari berbagai sumber:
- a. Ketidakpastian Proses: Variabilitas alami dalam proses biologis, seperti fluktuasi rekrutmen yang tidak dapat diprediksi.
 - b. Ketidakpastian Pengamatan: Kesalahan dalam pengukuran data (misalnya, kesalahan dalam melaporkan hasil tangkapan atau kesalahan dalam penentuan umur).
 - c. Ketidakpastian Model: Semua model adalah penyederhanaan dari realitas, dan pilihan model yang berbeda dapat memberikan hasil yang berbeda.
 - d. Ketidakpastian Implementasi: Nasihat ilmiah mungkin tidak diimplementasikan dengan sempurna oleh manajer.

Pendekatan modern tidak lagi mencoba untuk memberikan satu jawaban tunggal (misalnya, "MSY adalah tepat 10.000 ton"). Sebaliknya, mereka bertujuan untuk mengkuantifikasi ketidakpastian ini dan menyajikannya dalam bentuk probabilitas. Nasihat pengelolaan sering kali dibingkai dalam istilah risiko, misalnya: "Jika TAC ditetapkan sebesar 12.000 ton, ada probabilitas 30% bahwa stok akan berada di bawah batas biologis yang aman dalam 5 tahun." Pendekatan berbasis risiko ini memungkinkan manajer untuk membuat keputusan yang lebih terinformasi tentang tingkat risiko yang dapat mereka terima.

Siklus Pendugaan Stok

Proses pendugaan stok bukanlah kegiatan satu kali, melainkan sebuah siklus yang berkelanjutan dan adaptif.

1. Pengumpulan Data: Data baru (hasil tangkapan, upaya, data survei) dikumpulkan untuk tahun terbaru.
2. Analisis Data: Data biologis baru dianalisis untuk memperbarui parameter kunci (misalnya, pertumbuhan, kematangan).
3. Pemasangan Model (*Model Fitting*): Model pendugaan stok diperbarui dengan memasukkan data tahun terbaru.
4. Diagnosis Model: Ilmuwan dengan cermat memeriksa seberapa baik model tersebut cocok dengan semua sumber data yang tersedia.
5. Estimasi Status Stok: Model yang telah diperbarui digunakan untuk menghasilkan estimasi terbaru tentang status stok (misalnya, $B_{current}$ dan $F_{current}$).
6. Proyeksi dan Nasihat: Proyeksi jangka pendek dibuat untuk memberikan nasihat tentang tingkat penangkapan untuk tahun berikutnya (misalnya, rekomendasi TAC).
7. Keputusan Pengelolaan: Manajer menggunakan nasihat ilmiah, bersama dengan pertimbangan lain, untuk menetapkan peraturan perikanan.
8. Implementasi dan Pemantauan: Peraturan diimplementasikan, dan perikanan dipantau. Data baru dari perikanan ini kemudian menjadi input untuk siklus penilaian berikutnya di tahun depan.

Siklus ini memungkinkan adanya pengelolaan adaptif (*adaptive management*), di mana pemahaman kita tentang stok dan keputusan pengelolaan terus-menerus diperbarui seiring dengan masuknya informasi baru.

B. Model Produksi Surplus (Model Holistik)

Keluarga model pendugaan stok yang pertama dan paling sederhana secara konseptual adalah model produksi surplus, juga dikenal sebagai model holistik atau model biomassa agregat. Pendekatan ini memperlakukan seluruh biomassa stok ikan sebagai satu unit tunggal, tanpa membedakan

struktur umur atau ukurannya. Model ini tidak mencoba untuk memodelkan proses-proses biologis individu (pertumbuhan, rekrutmen, mortalitas) secara terpisah. Sebaliknya, ia secara langsung memodelkan hubungan antara hasil tangkapan (*yield*) dan upaya penangkapan (*effort*), dan bagaimana biomassa total merespons tekanan penangkapan.

Logika Dasar Logika di balik model produksi surplus didasarkan pada teori pertumbuhan populasi logistik.

1. **Produksi Bersih (*Surplus Production*):** Setiap populasi ikan memiliki kapasitas untuk tumbuh dan menghasilkan biomassa baru. "Produksi bersih" atau "produksi surplus" adalah jumlah total biomassa yang ditambahkan ke populasi dalam satu tahun melalui gabungan proses rekrutmen dan pertumbuhan individu, dikurangi dengan jumlah biomassa yang hilang karena mortalitas alami. Ini adalah surplus biomassa yang secara teoretis dapat "dipanen" oleh perikanan setiap tahun tanpa menyebabkan penurunan biomassa total dari tahun ke tahun.
2. **Bergantung pada Kepadatan:** Laju produksi surplus ini tidak konstan; ia bergantung pada ukuran (kepadatan) biomassa populasi saat ini.
 - a. **Pada Biomassa Sangat Rendah:** Produksi surplus rendah karena hanya ada sedikit ikan untuk bereproduksi dan tumbuh.
 - b. **Pada Biomassa Sangat Tinggi (mendekati Kapasitas Tampung, K):** Produksi surplus juga rendah. Meskipun ada banyak ikan, sumber daya (makanan, ruang) menjadi terbatas, sehingga laju pertumbuhan per kapita melambat. Selain itu, mortalitas alami mungkin meningkat karena kompetisi.
 - c. **Pada Biomassa Menengah:** Produksi surplus mencapai puncaknya. Ada cukup banyak ikan untuk menghasilkan biomassa baru, tetapi belum terlalu padat sehingga pertumbuhan terhambat oleh kompetisi.

Kurva Produksi Surplus Hubungan berbentuk kubah antara produksi surplus dan biomassa stok ini adalah inti dari model ini. Titik puncak dari kurva ini mewakili Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari (*Maximum Sustainable Yield - MSY*), yaitu hasil tangkapan teoretis terbesar yang dapat

diambil dari stok secara terus-menerus tanpa menipiskannya. Biomassa stok yang menghasilkan MSY disebut BMSY.

Data yang Dibutuhkan Keuntungan utama dari model produksi surplus adalah kebutuhan datanya yang relatif minimal dibandingkan dengan model berstruktur umur. Data inti yang dibutuhkan adalah:

1. Rangkaian Waktu Hasil Tangkapan (*Catch*): Data total hasil tangkapan (C) untuk stok tersebut selama periode bertahun-tahun (misalnya, 20 tahun atau lebih).
2. Rangkaian Waktu Upaya Penangkapan (*Effort*): Data total upaya penangkapan (E) yang sesuai dengan hasil tangkapan tersebut. Upaya harus diukur dengan unit yang konsisten dari waktu ke waktu (misalnya, jumlah hari pancing, jumlah jam pukat). Data upaya ini digunakan sebagai proksi untuk laju mortalitas penangkapan (F). Seringkali, data upaya ini digabungkan dengan data tangkapan untuk menghasilkan indeks kelimpahan, yaitu Hasil Tangkapan per Unit Upaya (*Catch Per Unit Effort* - CPUE). CPUE diasumsikan sebanding dengan biomassa stok.

Dengan data rangkaian waktu dari hasil tangkapan dan indeks kelimpahan (CPUE), model produksi surplus dapat dipasang untuk mengestimasi parameter-parameter kunci.

1. Pengenalan Model Schaefer dan Fox

Ada beberapa formulasi matematis yang berbeda untuk menggambarkan kurva produksi surplus yang berbentuk kubah. Dua model yang paling klasik dan paling terkenal adalah model Schaefer dan model Fox.

a. Model Schaefer (1954)

Model ini adalah model produksi surplus yang pertama dan paling sederhana. Ia mengasumsikan bahwa hubungan antara produksi surplus dan biomassa mengikuti kurva parabola simetris yang sempurna, yang didasarkan pada persamaan pertumbuhan logistik Verhulst.

Asumsi dan Persamaan:

- 1) Hubungan antara CPUE dan upaya (f) diasumsikan linier: $CPUE = a - bf$.
- 2) Kurva hasil tangkapan (Yield, Y) terhadap upaya (f) adalah parabola simetris: $Y = af - bf^2$.

Karakteristik Utama:

- 1) Simetris: Karena kurvanya simetris, produksi surplus maksimum (MSY) terjadi pada tingkat biomassa yang tepat setengah dari kapasitas tampung lingkungan (K).
 $BMSY = 0.5.K$
- 2) Upaya Optimum: Upaya penangkapan yang menghasilkan MSY ($fMSY$) juga tepat setengah dari upaya yang akan menyebabkan populasi runtuh secara teoretis.

Model Schaefer sangat berpengaruh secara historis dan mudah dipahami. Namun, asumsi bahwa kurva produksi selalu simetris mungkin tidak selalu realistis.

b. Model Fox (1970)

Model Fox adalah modifikasi dari model Schaefer yang sering kali memberikan kecocokan yang lebih baik untuk banyak stok ikan. Model ini didasarkan pada persamaan pertumbuhan Gompertz, yang menghasilkan kurva produksi surplus yang tidak simetris (asimetris).

Asumsi dan Persamaan:

- 1) Hubungan antara CPUE dan upaya (f) diasumsikan eksponensial: $\ln(CPUE) = a - bf$.
- 2) Kurva hasil tangkapan (Yield, Y) terhadap upaya (f) adalah kurva yang miring ke kanan (*right-skewed*).

Karakteristik Utama:

- 1) Asimetris: Dalam model Fox, puncak kurva (MSY) terjadi pada tingkat biomassa yang lebih rendah daripada di model Schaefer.
 $BMSY \approx 0.37.K$ (atau K/e)

- 2) Lebih Pesimis: Model Fox menyiratkan bahwa stok mencapai produktivitas maksimumnya pada tingkat penipisan yang lebih besar. Ini juga berarti bahwa setelah melewati titik MSY, hasil tangkapan menurun lebih lambat seiring dengan peningkatan upaya dibandingkan dengan model Schaefer.

Secara umum, model Fox sering dianggap sedikit lebih realistis daripada model Schaefer karena banyak populasi tampaknya memiliki produktivitas puncak pada tingkat biomassa di bawah 50% dari tingkat alamnya.

Pemasangan Model (Model *Fitting*) Baik model Schaefer maupun Fox dipasang pada data rangkaian waktu dari hasil tangkapan dan indeks kelimpahan (CPUE). Ada dua pendekatan utama:

- a. Model Keseimbangan (*Equilibrium Models*): Pendekatan yang lebih tua dan lebih sederhana ini mengasumsikan bahwa pada setiap tahun, stok berada dalam kondisi keseimbangan dengan tingkat upaya pada tahun tersebut. Metode ini tidak memperhitungkan dinamika dari tahun ke tahun dan sekarang dianggap kurang andal.
- b. Model Non-Keseimbangan (*Non-Equilibrium Models*) atau Model Dinamis: Ini adalah pendekatan modern dan yang lebih disukai. Model ini secara eksplisit memodelkan bagaimana biomassa pada tahun ini (B_t) berhubungan dengan biomassa pada tahun sebelumnya (B_{t-1}), produksi surplus, dan hasil tangkapan pada tahun sebelumnya (C_{t-1}). Persamaannya adalah:

$$B_t = B_{t-1} + \text{Produksi Surplus}(B_{t-1}) - C_{t-1}$$

Model dinamis ini jauh lebih realistis dan dapat menangkap dinamika stok dari waktu ke waktu. Perangkat lunak modern seperti ASPIC atau JABBA menggunakan pendekatan non-keseimbangan ini untuk memasang model produksi surplus.

2. Konsep Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari (MSY)

Output utama dan tujuan pengelolaan yang paling sering dikaitkan dengan model produksi surplus adalah Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari (*Maximum Sustainable Yield* - MSY).

Definisi: MSY didefinisikan sebagai hasil tangkapan rata-rata teoretis tertinggi yang dapat diambil dari suatu stok dalam jangka waktu yang tidak terbatas (lestari) di bawah kondisi lingkungan rata-rata yang konstan. Ini adalah puncak dari kurva produksi surplus.

Pentingnya MSY dalam Sejarah dan Kebijakan Konsep MSY telah menjadi landasan pengelolaan perikanan di seluruh dunia selama lebih dari setengah abad. Daya tariknya terletak pada kesederhanaannya yang tampak. Ia memberikan satu target tunggal yang jelas bagi para manajer: kelola perikanan sedemikian rupa sehingga dapat mencapai MSY. Tujuannya tampak optimal, baik secara biologis (tidak menghabiskan stok) maupun ekonomi (mendapatkan hasil tangkapan terbesar). Banyak perjanjian internasional dan undang-undang perikanan nasional, termasuk Konvensi PBB tentang Hukum Laut (UNCLOS), secara eksplisit menyebut MSY sebagai tujuan atau titik referensi utama untuk pengelolaan.

Titik Referensi Terkait MSY: Dari konsep MSY, kita dapat menurunkan beberapa titik referensi pengelolaan yang penting:

- a. MSY: Hasil tangkapan target (dalam ton).
- b. BMSY: Biomassa stok target. Tujuannya adalah untuk menjaga biomassa stok pada atau di atas tingkat BMSY. BMSY sering digunakan sebagai proksi untuk "biomassa yang sehat" dan sebagai titik referensi batas (*limit reference point*).
- c. FMSY atau EMSY: Laju mortalitas penangkapan atau tingkat upaya penangkapan yang, jika diterapkan secara konstan, akan menghasilkan MSY dalam jangka panjang. FMSY sering digunakan sebagai titik referensi target atau batas untuk tekanan penangkapan.

Kritik dan Keterbatasan MSY Meskipun sangat berpengaruh, konsep MSY sebagai satu-satunya tujuan pengelolaan telah menuai banyak kritik dalam beberapa dekade terakhir. Para ilmuwan dan manajer sekarang menyadari bahwa mengejar MSY sebagai target tunggal memiliki beberapa masalah serius:

- a. Ketidakpastian Estimasi: MSY bukanlah angka yang diketahui secara pasti. Ia adalah output dari model statistik yang memiliki ketidakpastian yang signifikan. Mengelola tepat pada estimasi titik MSY sangat berisiko;

karena kesalahan estimasi, kita bisa dengan mudah melampauinya dan menyebabkan penangkapan berlebih.

- b. Mengabaikan Variabilitas Lingkungan: Konsep MSY mengasumsikan “kondisi lingkungan rata-rata yang konstan”. Di dunia nyata, lingkungan sangat bervariasi, yang menyebabkan produktivitas dan rekrutmen berfluktuasi. Mengejar MSY yang dihitung dari tahun-tahun baik selama periode kondisi lingkungan yang buruk dapat dengan cepat menghabiskan stok.
- c. Tidak Mempertimbangkan Struktur Populasi: Model produksi surplus mengabaikan struktur umur dan ukuran. Menangkap sejumlah besar ikan muda sebelum mereka sempat tumbuh dan bereproduksi mungkin dapat menghasilkan hasil tangkapan yang tinggi dalam jangka pendek, tetapi dapat merusak potensi jangka panjang stok.
- d. Mengabaikan Interaksi Ekosistem: Mengejar MSY untuk satu spesies predator dapat secara drastis mengurangi populasi mangsanya, yang mungkin juga penting bagi spesies lain atau perikanan lain.
- e. “Tepi Jurang”: Mengelola tepat pada FMSY berarti menyeimbangkan stok di puncak kurva produksi. Ini adalah posisi yang secara inheren tidak stabil. Sedikit saja peningkatan upaya di atas FMSY akan mulai mendorong stok menuruni “sisi lain bukit” menuju penipisan, dengan hasil tangkapan yang juga menurun.

Pergeseran Paradigma: Dari MSY sebagai Target menjadi Titik Referensi Batas Karena masalah-masalah ini, telah terjadi pergeseran paradigma dalam pengelolaan perikanan modern. MSY tidak lagi dilihat sebagai target yang harus dicapai, melainkan lebih sering digunakan sebagai titik referensi batas (*limit reference point*) yang harus dihindari.

- a. Target Pengelolaan: Target yang sebenarnya sering kali ditetapkan secara lebih konservatif. Misalnya, target mortalitas penangkapan mungkin ditetapkan pada tingkat yang lebih rendah dari FMSY (misalnya, $0.9 \cdot \text{FMSY}$), dan target biomassa ditetapkan pada tingkat yang lebih tinggi dari BMSY.
- b. Pendekatan Kehati-hatian: Tujuannya bukan lagi untuk memaksimalkan hasil tangkapan, melainkan untuk mencapai “hasil tangkapan optimum

yang berkelanjutan" (*optimum sustainable yield*), yang secara eksplisit mempertimbangkan faktor-faktor ekologis, ekonomi, dan sosial, sambil menjaga risiko terhadap sumber daya tetap rendah.

Meskipun perannya telah berevolusi, konsep MSY dan model produksi surplus yang menghasilkannya tetap menjadi alat yang sangat penting dalam kotak peralatan pendugaan stok, terutama untuk perikanan yang miskin data di mana model yang lebih kompleks tidak dapat diterapkan.

C. Pengantar Model Analitik

Sementara model produksi surplus memberikan pandangan "gambaran besar" yang berguna dengan memperlakukan stok sebagai satu kotak hitam, sering kali kita memerlukan pemahaman yang lebih dalam tentang apa yang terjadi di dalam kotak hitam tersebut. Di sinilah keluarga model kedua dan yang lebih canggih masuk: model analitik. Berbeda dengan pendekatan holistik, model analitik secara eksplisit memasukkan struktur populasi, biasanya berdasarkan umur atau panjang, ke dalam analisis.

Model analitik tidak hanya melihat biomassa total; mereka melacak jumlah individu dalam setiap kohort (kelompok ikan yang lahir pada tahun yang sama) dari waktu ke waktu. Model-model ini secara matematis mengintegrasikan semua proses biologis kunci yang telah kita bahas—rekrutmen, pertumbuhan individu, kematangan, dan mortalitas—untuk membangun gambaran yang jauh lebih rinci tentang dinamika populasi.

Pendekatan analitik didasarkan pada logika bahwa nasib suatu populasi adalah jumlah dari nasib semua kohort yang menyusunnya. Dengan memodelkan bagaimana setiap kohort tumbuh, kehilangan individu karena mortalitas alami dan penangkapan, dan akhirnya berkontribusi pada stok pemijah, model analitik dapat memberikan wawasan yang lebih detail tentang bagaimana perikanan berinteraksi dengan populasi ikan.

Keunggulan Model Analitik:

1. Lebih Realistis secara Biologis: Dengan secara eksplisit memasukkan pertumbuhan dan struktur umur, model ini lebih mendekati realitas biologis dari dinamika populasi ikan.

2. Wawasan yang Lebih Detail: Mereka dapat membedakan antara pertumbuhan berlebih (*growth overfishing*—menangkap ikan sebelum mereka sempat tumbuh besar) dan rekrutmen berlebih (*recruitment overfishing*—mengurangi stok pemijah hingga rekrutmen terganggu).
3. Evaluasi Regulasi Spesifik: Model ini sangat baik untuk mengevaluasi dampak dari peraturan teknis yang bergantung pada ukuran, seperti batas ukuran tangkap minimum atau perubahan selektivitas alat tangkap (misalnya, ukuran mata jaring).
4. Proyeksi yang Lebih Kuat: Karena didasarkan pada proses-proses yang mendasarinya, proyeksi jangka panjang dari model analitik sering kali dianggap lebih andal.

Kelemahan Model Analitik:

- **Kebutuhan Data yang Sangat Tinggi:** Ini adalah tantangan utamanya. Model analitik memerlukan data yang jauh lebih detail dan mahal untuk dikumpulkan, terutama data hasil tangkapan per umur (*catch-at-age*) atau hasil tangkapan per panjang (*catch-at-length*) selama periode bertahun-tahun.

Karena kebutuhan datanya yang tinggi, model analitik paling sering diterapkan pada perikanan bernilai tinggi di negara-negara maju yang memiliki program pemantauan jangka panjang. Namun, konsep-konsep di baliknya bersifat universal dan merupakan tujuan yang ingin dicapai oleh banyak program riset perikanan di seluruh dunia, termasuk di Indonesia.

Data Inti: Hasil Tangkapan per Umur (*Catch-at-Age*)

Bahan bakar utama untuk sebagian besar model analitik adalah matriks hasil tangkapan per umur (*catch-at-age*). Ini adalah tabel yang menunjukkan estimasi jumlah total ikan yang ditangkap pada setiap kelas umur (misalnya, umur 1, 2, 3, dst.) untuk setiap tahun dalam periode penilaian.

Membuat matriks ini adalah proses multi-tahap yang membutuhkan program pemantauan yang komprehensif:

1. **Estimasi Total Hasil Tangkapan:** Pertama, kita memerlukan estimasi yang andal dari total hasil tangkapan (dalam jumlah atau berat) untuk setiap tahun.

2. Pengambilan Sampel Representatif: Sampel acak yang besar harus diambil dari hasil tangkapan komersial sepanjang tahun untuk menangkap variasi musiman.
3. Pengukuran Frekuensi Panjang: Semua ikan dalam sampel diukur panjangnya untuk membuat distribusi frekuensi panjang dari hasil tangkapan.
4. Pengambilan Sub-sampel Umur: Dari sampel panjang, sub-sampel ikan diambil untuk penentuan umur (misalnya, dari otolit). Penting agar sub-sampel ini mencakup seluruh rentang ukuran yang ada dalam hasil tangkapan.
5. Pembuatan Kunci Umur-Panjang (*Age-Length Key* - ALK): Data umur dan panjang dari sub-sampel digunakan untuk membuat ALK. ALK adalah tabel probabilitas yang menunjukkan, untuk setiap kelas panjang tertentu, proporsi ikan yang termasuk dalam setiap kelas umur.
 - Contoh ALK (disederhanakan): Untuk ikan dengan panjang 20-22 cm, ALK mungkin menunjukkan: 10% berumur 2 tahun, 85% berumur 3 tahun, dan 5% berumur 4 tahun.
6. Aplikasi ALK: ALK yang telah dibuat kemudian diterapkan pada data distribusi frekuensi panjang total dari hasil tangkapan. Ini memungkinkan kita untuk "mengkonversi" seluruh distribusi panjang menjadi estimasi jumlah total ikan yang tertangkap pada setiap umur untuk tahun tersebut.
7. Pengulangan: Proses ini harus diulang untuk setiap tahun dalam periode penilaian, karena ALK dapat berubah dari tahun ke tahun seiring dengan perubahan laju pertumbuhan atau kekuatan kohort.

Proses yang intensif ini menyoroiti mengapa model analitik sangat menuntut data. Namun, matriks hasil tangkapan per umur yang dihasilkan adalah salah satu set data paling informatif dalam ilmu perikanan, yang memungkinkan kita untuk "melihat" ke dalam populasi dan melacak nasib setiap angkatan dari waktu ke waktu.

1. Konsep Model Dinamika Populasi Berdasarkan Umur atau Panjang

Model analitik bekerja dengan merekonstruksi sejarah populasi dari data hasil tangkapan per umur. Ada beberapa jenis model dalam keluarga ini, tetapi semuanya berbagi logika dasar yang sama, yang sering disebut sebagai analisis kohort.

Analisis Kohort: Mengikuti Generasi

Ide inti dari analisis kohort adalah untuk mengikuti satu kohort (semua ikan yang lahir pada tahun yang sama, juga disebut angkatan atau *year-class*) sepanjang hidupnya. Kita ingin tahu berapa jumlah individu dalam kohort tersebut pada awalnya, dan bagaimana jumlahnya menurun dari tahun ke tahun karena mortalitas alami dan penangkapan.

Persamaan dasar yang mengatur penurunan jumlah dalam sebuah kohort antara umur t dan umur $t+1$ adalah:

$$N_{t+1} = N_t e^{-Z_t}$$

dimana Z_t adalah mortalitas total yang dialami oleh kohort tersebut selama tahun itu.

Hasil tangkapan (dalam jumlah) dari kohort tersebut selama tahun itu (C_t) juga berhubungan dengan jumlah populasi dan laju mortalitas melalui persamaan hasil tangkapan Baranov:

$$C_t = Z_t F_t N_t (1 - e^{-Z_t})$$

dimana F_t adalah mortalitas penangkapan pada tahun itu.

Analisis Kohort Virtual (*Virtual Population Analysis - VPA*)

Masalahnya adalah, kita tidak pernah bisa mengamati secara langsung jumlah ikan di laut (N_t). Yang bisa kita amati hanyalah jumlah ikan yang ditangkap (C_t). Analisis Kohort Virtual (VPA) adalah metode cerdas yang membalikkan logika ini. Alih-alih bergerak maju dalam waktu, VPA bekerja mundur dalam waktu untuk merekonstruksi ukuran populasi di masa lalu.

Logika VPA:

- Titik Awal: VPA dimulai dari kelas umur tertua dalam data hasil tangkapan untuk suatu kohort. Kita harus membuat asumsi tentang

mortalitas penangkapan (F) untuk kelas umur tertua ini (disebut F terminal).

- b. Langkah Mundur Pertama: Dengan mengetahui hasil tangkapan umur tertua (C_{terakhir}) dan dengan asumsi F terminal dan M , kita dapat menghitung berapa jumlah ikan yang pasti ada di laut pada awal tahun terakhir agar hasil tangkapan tersebut dapat terjadi. Ini memberikan kita estimasi N_{terakhir} .
- c. Iterasi Mundur: Sekarang kita tahu N_{terakhir} , yang merupakan jumlah ikan yang selamat dari tahun sebelumnya. Dengan menggunakan persamaan populasi secara terbalik, kita dapat menghitung berapa jumlah ikan yang pasti ada di laut pada awal tahun sebelumnya ($N_{\text{terakhir}} - 1$) untuk menghasilkan N_{terakhir} setelah mengalami mortalitas.
- d. Rekonstruksi Penuh: Proses ini diulang, langkah demi langkah mundur dalam waktu, menghitung jumlah populasi pada umur yang semakin muda, sampai kita merekonstruksi seluruh sejarah kelimpahan dari kohort tersebut dari saat ia pertama kali masuk ke dalam perikanan.

Dengan melakukan VPA untuk setiap kohort dalam data hasil tangkapan per umur, kita dapat membangun gambaran lengkap tentang kelimpahan populasi dan mortalitas penangkapan untuk setiap umur dan setiap tahun di masa lalu.

Model Statistik Modern (*Statistical Catch-at-Age - SCA*) VPA adalah metode deterministik yang lebih tua. Pendekatan modern yang lebih disukai adalah Model Statistik Tangkapan per Umur (*Statistical Catch-at-Age - SCA*). SCA bekerja dengan prinsip yang sama (memodelkan dinamika kohort), tetapi melakukannya dalam kerangka kerja statistik yang jauh lebih fleksibel.

- a. Bergerak Maju: SCA biasanya bekerja maju dalam waktu, memproyeksikan populasi dari tahun ke tahun.
- b. Memasangkan ke Banyak Data: Alih-alih hanya menggunakan data hasil tangkapan per umur, model SCA secara simultan memasang (fit) prediksinya ke berbagai sumber data, seperti data hasil tangkapan

per umur, indeks kelimpahan dari survei, dan bahkan data komposisi panjang.

- c. Mengestimasi Parameter: Model ini mengestimasi parameter-parameter kunci (seperti rekrutmen tahunan dan mortalitas penangkapan tahunan) dengan menemukan nilai-nilai yang meminimalkan ketidaksesuaian antara prediksi model dan semua data observasi secara bersamaan.

Model SCA (seperti yang digunakan dalam perangkat lunak *Stock Synthesis* atau ASAP) adalah alat kerja utama dalam banyak penilaian stok modern di seluruh dunia.

Analisis Hasil per Rekrut (*Yield-per-Recruit* - YPR)

Salah satu aplikasi paling kuat dari model analitik adalah analisis hasil per rekrut (YPR). Analisis ini adalah alat strategis yang membantu menjawab pertanyaan: "Bagaimana kita seharusnya menangkap ikan untuk mendapatkan hasil tangkapan (*yield*) jangka panjang yang paling besar dari setiap ikan yang masuk ke dalam populasi?".

Analisis YPR tidak mencoba untuk memprediksi hasil tangkapan total, karena itu akan bergantung pada rekrutmen yang berfluktuasi. Sebaliknya, ia berfokus pada pertanyaan yang lebih terkontrol: Untuk setiap satu juta rekrut yang masuk ke dalam perikanan pada umur t_r , berapa total berat hasil tangkapan yang akan kita peroleh dari seluruh kohort tersebut selama masa hidupnya, di bawah berbagai kombinasi tingkat penangkapan dan ukuran tangkap?

Logika YPR: Analisis YPR adalah sebuah simulasi. Ia mengikuti sebuah kohort teoretis (misalnya, dimulai dengan 1 juta ikan) dari umur rekrutmen (t_r) hingga umur maksimum (t_{max}).

- a. Penambahan Biomassa: Selama masa hidupnya, biomassa total dari kohort tersebut akan bertambah karena individu-individu di dalamnya tumbuh (berdasarkan kurva pertumbuhan *von Bertalanffy*).
- b. Pengurangan Biomassa: Pada saat yang sama, biomassa total dari kohort tersebut akan berkurang karena individu-individu mati. Jumlah individu menurun karena mortalitas alami (M) dan mortalitas penangkapan (F).

Analisis YPR secara matematis menyeimbangkan kedua proses yang berlawanan ini (pertumbuhan vs. mortalitas) untuk menghitung total hasil tangkapan (dalam berat) yang dapat diperoleh dari kohort tersebut.

Faktor yang Dievaluasi: Analisis YPR digunakan untuk mengeksplorasi dampak dari dua tuas kontrol utama yang dimiliki manajer:

- a. Intensitas Penangkapan: Diwakili oleh mortalitas penangkapan (F). Apa yang terjadi pada YPR jika kita menangkap ikan dengan sangat intensif (F tinggi) vs. secara ringan (F rendah)?
- b. Ukuran/Umur saat Pertama Kali Ditangkap: Diwakili oleh umur saat pertama kali ditangkap (t_c). Apa yang terjadi pada YPR jika kita mulai menangkap ikan pada saat mereka masih sangat muda (t_c rendah) vs. membiarkan mereka tumbuh lebih besar terlebih dahulu (t_c tinggi)? t_c ini dikontrol melalui regulasi seperti ukuran mata jaring atau batas ukuran tangkap minimum.

Output dan Interpretasi Analisis YPR

Output dari analisis YPR biasanya disajikan dalam bentuk kurva atau permukaan kontur. Kurva YPR yang paling umum memplot Hasil per Rekrut (YPR) pada sumbu Y terhadap berbagai tingkat Mortalitas Penangkapan (F) pada sumbu X, untuk nilai t_c tertentu.

Kurva YPR yang khas biasanya memiliki bentuk kubah:

- a. Pada F Rendah: YPR rendah karena kita tidak mengambil cukup banyak ikan. Banyak ikan yang akhirnya mati karena penyebab alami sebelum sempat ditangkap.
- b. Peningkatan F : Seiring dengan meningkatnya F , YPR juga meningkat. Kita menangkap proporsi yang lebih besar dari biomassa yang tersedia.
- c. Mencapai Puncak (F_{max}): Kurva mencapai titik puncak pada tingkat F tertentu. Titik ini disebut F_{max} . Ini adalah tingkat mortalitas penangkapan yang menghasilkan hasil per rekrut maksimum yang mungkin terjadi.
- d. Penurunan setelah Puncak (Pertumbuhan Berlebih): Jika F terus ditingkatkan melampaui F_{max} , YPR justru akan mulai menurun. Fenomena ini disebut pertumbuhan berlebih (*growth overfishing*). Ini

terjadi karena tekanan penangkapan menjadi begitu intensif sehingga ikan ditangkap pada saat mereka masih sangat muda dan kecil. Kita menangkap begitu banyak ikan kecil sehingga kita kehilangan potensi hasil tangkapan yang jauh lebih besar yang bisa kita peroleh jika kita membiarkan mereka tumbuh lebih besar terlebih dahulu.

Titik Referensi dari YPR: Analisis YPR menghasilkan beberapa titik referensi biologis (*Biological Reference Points* - BRPs) yang sangat penting:

- a. F_{max} : Tingkat F yang memaksimalkan YPR. Secara historis, ini sering digunakan sebagai target pengelolaan. Namun, seperti MSY, mengelola tepat pada F_{max} bisa berisiko karena puncaknya sering kali datar dan estimasinya tidak pasti.
- b. $F_{0.1}$: Ini adalah titik referensi yang lebih konservatif dan sekarang lebih disukai. $F_{0.1}$ didefinisikan sebagai tingkat F di mana kemiringan (slope) dari kurva YPR hanya 10% dari kemiringan di titik awal (*origin*). Secara praktis, ini adalah titik di mana untuk mendapatkan sedikit saja peningkatan YPR, kita harus meningkatkan upaya penangkapan secara besar-besaran. Mengelola pada $F_{0.1}$ menghasilkan hasil tangkapan yang hampir sama dengan F_{max} tetapi dengan tingkat upaya (dan biaya) yang jauh lebih rendah, dan memberikan penyangga keamanan (*buffer*) yang lebih besar bagi stok. $F_{0.1}$ sering digunakan sebagai proksi untuk FMSY.

Analisis YPR adalah alat yang sangat kuat karena ia memungkinkan manajer untuk melihat secara eksplisit *trade-off* antara menangkap ikan sekarang (pada ukuran kecil) versus membiarkannya tumbuh untuk mendapatkan hasil yang lebih besar di masa depan.

Analisis Biomassa Stok Pemijah per Rekrut (SSB/R)

Analisis YPR berfokus pada memaksimalkan hasil tangkapan. Namun, ia memiliki satu kelemahan besar: ia sama sekali tidak mempertimbangkan dampak penangkapan terhadap kemampuan stok untuk bereproduksi. Analisis YPR tidak memasukkan hubungan stok-rekrutmen. Secara teoretis, YPR akan terus meningkat hingga F_{max} bahkan jika tingkat F tersebut sangat tinggi sehingga hanya menyisakan sedikit sekali ikan dewasa untuk memijah. Jika ini terjadi, kita mungkin akan mengalami rekrutmen berlebih

(*recruitment overfishing*), di mana stok pemijah menjadi begitu terkuras sehingga rekrutmen gagal dan populasi runtuh.

Untuk mengatasi masalah ini, dikembangkanlah analisis pendamping yang berfokus pada konservasi: analisis biomassa stok pemijah per rekrut (*Spawning Stock Biomass per Recruit - SSB/R*), juga sering disebut Spawning Potential Ratio (SPR).

Logika SSB/R: Analisis SSB/R bekerja dengan logika yang sama seperti YPR, yaitu mengikuti sebuah kohort teoretis. Namun, alih-alih menghitung hasil tangkapan dari kohort tersebut, ia menghitung total biomassa pemijah yang akan dihasilkan oleh kohort tersebut selama masa hidupnya. Ia menyeimbangkan pertumbuhan dan mortalitas, tetapi juga memperhitungkan jadwal kematangan (proporsi ikan yang matang pada setiap umur).

Tujuannya adalah untuk menjawab pertanyaan: "Seberapa besar dampak dari tingkat penangkapan (F) yang berbeda terhadap total potensi reproduktif seumur hidup dari setiap rekrut?".

Output dan Interpretasi SSB/R: Output dari analisis SSB/R adalah kurva yang memplot SSB/R pada sumbu Y terhadap berbagai tingkat Mortalitas Penangkapan (F) pada sumbu X.

- a. Pada $F=0$ (Kondisi Tak Terganggu): Ketika tidak ada penangkapan, SSB/R berada pada tingkat maksimumnya. Ini merepresentasikan potensi reproduktif seumur hidup yang tidak terganggu dari seorang rekrut. Nilai ini sering digunakan sebagai dasar perbandingan (ditetapkan sebagai 100% atau 1.0).
- b. Seiring Peningkatan F : Kurva SSB/R akan selalu menurun. Semakin tinggi F , semakin sedikit individu yang bertahan hidup hingga mencapai umur matang dan berkontribusi pada pemijahan.

Titik Referensi dari SSB/R: Analisis SSB/R digunakan untuk menetapkan titik referensi batas (*limit reference points*) yang berfokus pada konservasi. Titik referensi ini biasanya dinyatakan sebagai persentase dari potensi pemijahan yang tidak terganggu.

- a. Contoh: Banyak badan pengelolaan perikanan menetapkan bahwa SSB/R tidak boleh dibiarkan turun di bawah 20% hingga 30% dari tingkat tak terganggu. Tingkat ini dianggap sebagai ambang batas proksi di mana risiko kegagalan rekrutmen menjadi sangat tinggi.
- b. F%SSB: Dari kurva SSB/R, kita dapat menentukan tingkat F yang akan menghasilkan tingkat SSB/R tertentu. Misalnya, F30% adalah tingkat mortalitas penangkapan yang, jika diterapkan, akan mengurangi SSB/R menjadi 30% dari tingkat alaminya. Nilai F seperti ini sering digunakan sebagai batas atas untuk mortalitas penangkapan yang diizinkan.

Menggabungkan YPR dan SSB/R: Kekuatan sejati dari pendekatan analitik modern terletak pada penggunaan analisis YPR dan SSB/R secara bersamaan.

- YPR memberitahu kita tentang target hasil tangkapan.
- SSB/R memberitahu kita tentang batasan konservasi.

Manajer dapat mencari tingkat F yang mencapai "hasil yang cukup baik" (*pretty good yield*) dari kurva YPR (misalnya, dekat F0.1) sambil memastikan bahwa tingkat F yang sama masih menjaga SSB/R di atas ambang batas aman (misalnya, di atas F30%). Pendekatan terpadu ini memungkinkan pengelolaan untuk menyeimbangkan tujuan eksploitasi dengan keharusan untuk melestarikan kapasitas reproduktif stok untuk jangka panjang.

Setelah melalui perjalanan panjang memahami biologi ikan dan metode-metode kuantitatif untuk menilai status stoknya, kita sekarang sampai pada tujuan akhir dari semua upaya ini: manajemen perikanan. Jika pendugaan stok adalah proses diagnosis, maka manajemen perikanan adalah proses perumusan resep dan terapi. Ini adalah ranah di mana ilmu pengetahuan bertemu dengan kebijakan, dan di mana analisis biologis diterjemahkan menjadi tindakan nyata di lapangan.

Manajemen perikanan dapat didefinisikan sebagai proses terpadu dari pengumpulan informasi, analisis, perencanaan, konsultasi, pengambilan keputusan, alokasi sumber daya, dan implementasi serta penegakan hukum dari serangkaian peraturan yang mengatur aktivitas perikanan, dengan tujuan untuk memastikan produktivitas sumber daya yang berkelanjutan dan pencapaian tujuan-tujuan lain yang telah ditetapkan.

Ini adalah proses yang secara inheren bersifat manusiawi. Ikan tidak perlu dikelola; mereka telah ada selama jutaan tahun. Yang sebenarnya kita kelola adalah manusia—yaitu, perilaku dan dampak dari para nelayan dan pemangku kepentingan lainnya terhadap sumber daya ikan dan ekosistemnya. Oleh karena itu, manajemen perikanan yang efektif tidak hanya membutuhkan ilmu biologi yang kuat, tetapi juga pemahaman tentang ilmu sosial, ekonomi, dan politik.

Dasar dari setiap rencana manajemen yang baik adalah penetapan tujuan (*objectives*) yang jelas. Tanpa tujuan yang jelas, tidak mungkin untuk merancang strategi yang efektif atau untuk mengukur keberhasilan. Bab ini akan mengeksplorasi berbagai tujuan yang dapat dikejar dalam manajemen perikanan, yang sering kali melampaui sekadar target biologis. Selanjutnya, kita akan membahas “kotak peralatan” manajemen—yaitu, berbagai jenis perangkat atau instrumen regulasi yang dapat digunakan

oleh manajer untuk mengontrol dampak perikanan. Terakhir, kita akan melihat bagaimana semua ini diintegrasikan ke dalam kerangka kerja modern yang lebih holistik, yaitu Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (EAFM).

A. Tujuan Pengelolaan Perikanan

Setiap tindakan manajemen harus didasarkan pada tujuan yang telah disepakati sebelumnya. Bertanya “Apa strategi manajemen terbaik?” adalah pertanyaan yang tidak lengkap. Pertanyaan yang lengkap adalah “Apa strategi manajemen terbaik untuk mencapai tujuan X?”. Tujuan yang berbeda akan secara logis mengarah pada strategi manajemen yang berbeda pula.

Secara historis, tujuan utama dari manajemen perikanan sering kali sangat sempit dan berfokus secara eksklusif pada stok target. Selama sebagian besar abad ke-20, tujuan yang dominan, baik secara eksplisit maupun implisit, adalah untuk mencapai Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari (MSY). Seperti yang telah dibahas, MSY menawarkan target yang tampaknya sederhana dan menarik: memaksimalkan jumlah protein yang dapat dipanen dari laut secara berkelanjutan. Tujuannya adalah untuk mengkalibrasi upaya penangkapan sedemikian rupa sehingga stok dijaga pada tingkat yang menghasilkan produktivitas biologis tertinggi. Semua fokus diarahkan pada memaksimalkan hasil tangkapan dari spesies target.

Namun, seiring dengan berjalannya waktu dan bertambahnya pengalaman (termasuk banyak kegagalan), menjadi jelas bahwa fokus tunggal pada MSY tidaklah cukup dan sering kali menyesatkan. Ada beberapa alasan untuk pergeseran paradigma ini:

1. Kegagalan Mencapai MSY: Seperti yang telah kita lihat, MSY adalah konsep teoretis yang sulit diestimasi dengan akurat dan sangat sensitif terhadap variabilitas lingkungan. Mengejar target MSY yang tidak pasti sering kali berujung pada penangkapan berlebih.
2. Mengabaikan Pertimbangan Ekonomi: Manajemen yang hanya berfokus pada memaksimalkan tonase hasil tangkapan sering kali mengabaikan efisiensi ekonomi. Tingkat upaya yang diperlukan untuk

mencapai MSY (EMSY) sering kali jauh lebih tinggi daripada tingkat upaya yang akan memaksimalkan keuntungan ekonomi (*Maximum Economic Yield* - MEY). Mengejar MSY dapat menyebabkan situasi di mana terlalu banyak kapal mengejar terlalu sedikit ikan, dengan keuntungan yang sangat tipis atau bahkan merugi.

3. Mengabaikan Dampak Ekologis: Fokus pada spesies tunggal mengabaikan dampak perikanan terhadap komponen ekosistem lainnya, seperti bycatch spesies non-target, kerusakan habitat oleh alat tangkap, dan gangguan pada jaring-jaring makanan.
4. Mengabaikan Dimensi Sosial: Manajemen berbasis MSY tidak secara eksplisit mempertimbangkan tujuan-tujuan sosial yang penting, seperti menjaga lapangan kerja bagi komunitas nelayan, memastikan distribusi manfaat yang adil, atau melestarikan nilai-nilai budaya yang terkait dengan perikanan.

Karena keterbatasan ini, paradigma manajemen modern telah bergerak melampaui MSY. Tujuannya sekarang jauh lebih luas dan multi-dimensi, mencoba untuk menyeimbangkan berbagai tujuan yang sering kali saling bertentangan.

1. Melampaui MSY: Tujuan Biologis, Ekonomi, dan Sosial

Manajemen perikanan modern yang efektif mengakui bahwa ada tiga pilar utama dari tujuan yang harus dipertimbangkan dan diseimbangkan. Setiap pilar memiliki serangkaian tujuannya sendiri.

a. Tujuan Biologis dan Ekologis (*Biological/Ecological Objectives*)

Ini tetap menjadi fondasi dari semua tujuan lainnya. Tanpa sumber daya yang sehat, tidak akan ada manfaat ekonomi atau sosial yang dapat diperoleh dalam jangka panjang. Tujuan dalam domain ini berfokus pada kelestarian sumber daya dan integritas ekosistem.

- 1) **Konservasi Stok Target:** Tujuan utamanya adalah untuk mencegah penangkapan berlebih dan menjaga populasi target pada tingkat yang dapat memastikan produktivitasnya di masa depan. Ini berarti menjaga Biomassa Stok Pemijah (SSB) di atas titik referensi

batas (*limit reference point*) untuk menghindari risiko kegagalan rekrutmen.

- 2) Mempertahankan Struktur Populasi: Selain biomassa total, tujuannya juga untuk mempertahankan struktur umur dan ukuran yang sehat dalam populasi. Ini termasuk melindungi ikan-ikan besar yang tua dan sangat fekund (BOFFFFs) yang penting untuk potensi reproduktif.
- 3) Meminimalkan Dampak pada Spesies Non-Target: Mengurangi hasil tangkapan sampingan (*bycatch*), terutama pada spesies yang rentan atau terancam punah seperti penyu, mamalia laut, burung laut, dan hiu.
- 4) Melindungi Habitat Kritis: Mencegah kerusakan atau kehancuran habitat yang penting bagi siklus hidup ikan, seperti terumbu karang, padang lamun, dan hutan bakau, yang berfungsi sebagai area pemijahan, asuhan, dan pakan.
- 5) Menjaga Fungsi Ekosistem: Memastikan bahwa perikanan tidak secara fundamental mengubah struktur dan fungsi jaring-jaring makanan (misalnya, dengan menghindari *fishing down the food web*) atau proses ekologis kunci lainnya.

Tujuan-tujuan biologis ini sering kali diterjemahkan ke dalam titik referensi operasional yang dihasilkan dari proses pendugaan stok, seperti $F_{target} < F_{limit}$ dan $B_{target} > B_{limit}$.

b. Tujuan Ekonomi (*Economic Objectives*)

Tujuan ekonomi berfokus pada kinerja keuangan dari perikanan sebagai sebuah industri. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa perikanan tidak hanya berkelanjutan secara biologis, tetapi juga layak secara ekonomi.

- 1) Memaksimalkan Keuntungan Ekonomi (*Rent*): Tujuan utamanya sering kali adalah untuk memaksimalkan sewa ekonomi (*economic rent*) dari perikanan. Sewa ekonomi adalah selisih antara total pendapatan dari hasil tangkapan dan total biaya penangkapan. Titik di mana sewa ini maksimal disebut Hasil Ekonomi Maksimum (*Maximum Economic Yield* - MEY). Penting untuk dicatat bahwa

tingkat upaya yang diperlukan untuk mencapai MEY hampir selalu lebih rendah daripada tingkat upaya yang diperlukan untuk mencapai MSY. Ini karena pada tingkat MSY, biaya penangkapan sudah sangat tinggi sehingga keuntungan marjinalnya kecil atau bahkan negatif. Mengelola untuk MEY, bukan MSY, akan menghasilkan armada yang lebih kecil dan lebih efisien, dengan keuntungan yang lebih tinggi per unit upaya.

- 2) Meningkatkan Efisiensi Armada: Mengurangi kelebihan kapasitas (*overcapacity*) dalam armada perikanan, di mana terlalu banyak kapal dan tenaga kerja yang tidak efisien mengejar sumber daya yang terbatas.
- 3) Menghasilkan Pendapatan Ekspor: Bagi banyak negara, termasuk Indonesia, perikanan adalah sumber devisa yang penting melalui ekspor produk-produk bernilai tinggi seperti tuna dan udang.
- 4) Menstabilkan Pendapatan: Mengurangi fluktuasi besar dalam hasil tangkapan dan pendapatan dari tahun ke tahun untuk memberikan kepastian yang lebih besar bagi industri.

c. Tujuan Sosial (*Social Objectives*)

Tujuan sosial berkaitan dengan kesejahteraan manusia, terutama bagi para nelayan dan komunitas pesisir yang kehidupannya sangat bergantung pada perikanan.

- 1) Memaksimalkan dan Menjaga Lapangan Kerja: Perikanan, terutama perikanan skala kecil, sering kali merupakan sumber lapangan kerja yang sangat penting di daerah pesisir di mana alternatif pekerjaan lain terbatas.
- 2) Memastikan Ketahanan Pangan (*Food Security*): Ikan adalah sumber protein hewani yang vital bagi jutaan orang di seluruh dunia. Tujuan manajemen dapat mencakup memastikan pasokan ikan yang terjangkau dan stabil untuk konsumsi domestik.
- 3) Meningkatkan Keselamatan di Laut: Mendorong praktik penangkapan yang aman dan mengurangi kecelakaan di laut.
- 4) Melestarikan Gaya Hidup dan Budaya: Bagi banyak komunitas, perikanan bukan hanya pekerjaan, tetapi juga cara hidup dan

bagian penting dari identitas budaya mereka. Tujuan manajemen mungkin termasuk melindungi perikanan tradisional skala kecil.

- 5) Distribusi Manfaat yang Adil (*Equity*): Memastikan bahwa manfaat dari sumber daya perikanan (seperti akses atau kuota) didistribusikan secara adil di antara berbagai kelompok pemangku kepentingan (misalnya, antara perikanan skala kecil dan industri, atau antara generasi saat ini dan masa depan).
- 6) Menghindari Konflik Sosial: Mengelola perikanan dengan cara yang meminimalkan konflik antar kelompok nelayan (misalnya, konflik antara pengguna alat tangkap yang berbeda).

Trade-offs: Tantangan Penyeimbangan Tantangan terbesar dalam manajemen perikanan modern adalah bahwa tujuan-tujuan ini sering kali saling bertentangan (*trade-offs*). Tidak mungkin untuk memaksimalkan semuanya secara bersamaan.

- 1) MSY vs. MEY: Memaksimalkan hasil tangkapan (MSY) hampir selalu berarti mengorbankan keuntungan ekonomi maksimum (MEY).
- 2) Efisiensi Ekonomi vs. Lapangan Kerja: Strategi untuk memaksimalkan keuntungan (MEY) biasanya melibatkan pengurangan jumlah kapal dan nelayan untuk meningkatkan efisiensi. Ini secara langsung bertentangan dengan tujuan untuk memaksimalkan lapangan kerja.
- 3) Konservasi vs. Hasil Tangkapan: Perlindungan habitat yang ketat atau penutupan area yang luas untuk tujuan konservasi mungkin akan mengurangi hasil tangkapan yang tersedia bagi nelayan dalam jangka pendek.

Oleh karena itu, proses manajemen perikanan pada intinya adalah proses negosiasi dan pengambilan keputusan politik untuk menyeimbangkan *trade-offs* ini. Peran ilmuwan adalah untuk menerangi *trade-offs* ini secara eksplisit—yaitu, untuk menunjukkan kepada para manajer dan pemangku kepentingan apa konsekuensi (biologis, ekonomi, sosial) dari setiap pilihan kebijakan. Keputusan akhir tentang keseimbangan mana yang akan dipilih adalah keputusan masyarakat yang harus dibuat melalui proses kebijakan publik yang transparan.

B. Perangkat Manajemen Perikanan (Management Tools)

Setelah menetapkan serangkaian tujuan yang jelas—baik itu biologis, ekonomi, maupun sosial—tugas berikutnya bagi seorang manajer perikanan adalah memilih dan menerapkan perangkat atau instrumen yang tepat untuk mencapai tujuan-tujuan tersebut. Jika tujuan adalah “apa” yang ingin kita capai, maka perangkat manajemen adalah “bagaimana” kita mencapainya. Perangkat manajemen adalah serangkaian peraturan dan tindakan spesifik yang dirancang untuk mengontrol perilaku armada perikanan dan membatasi dampak totalnya terhadap sumber daya ikan.

Pemilihan perangkat manajemen yang tepat bukanlah hal yang sepele. Efektivitas suatu peraturan sangat bergantung pada biologi spesies target, karakteristik armada perikanan, konteks sosial-ekonomi, dan kapasitas institusi untuk memantau dan menegakkan aturan tersebut. Perangkat yang berhasil untuk perikanan pukat cincin pelagis di laut lepas mungkin sama sekali tidak cocok untuk perikanan pancing ulur skala kecil di terumbu karang.

Secara umum, “kotak peralatan” manajemen perikanan berisi dua kategori utama dari perangkat regulasi, yang dibedakan berdasarkan apa yang mereka coba kontrol secara langsung:

1. Pengaturan Input (*Input Controls*): Perangkat ini berfokus pada pengendalian upaya penangkapan (fishing effort) yang masuk ke dalam perikanan. Logikanya adalah, dengan membatasi jumlah atau kekuatan dari alat-alat produksi (kapal, alat tangkap, waktu), kita secara tidak langsung akan mengontrol jumlah ikan yang ditangkap. Ini adalah pendekatan yang mencoba mengontrol “penyebab” dari mortalitas penangkapan.
2. Pengaturan Output (*Output Controls*): Perangkat ini berfokus pada pengendalian hasil tangkapan (*catch*) yang keluar dari perikanan. Logikanya adalah, dengan secara langsung membatasi jumlah ikan yang boleh diambil, kita memastikan bahwa mortalitas penangkapan tidak melebihi tingkat yang telah ditentukan, terlepas dari seberapa besar upaya yang digunakan untuk menangkapnya. Ini adalah pendekatan yang mencoba mengontrol “akibat” dari mortalitas penangkapan.

Selain dua kategori utama ini, ada juga peraturan teknis (*technical measures*), yang sering kali tumpang tindih dengan keduanya. Peraturan teknis dirancang untuk mengubah bagaimana, kapan, dan di mana ikan ditangkap untuk meningkatkan selektivitas dan mengurangi dampak ekologis. Contohnya termasuk batasan ukuran mata jaring, kewajiban menggunakan alat bantu pengurangan *bycatch*, atau penutupan area pemijahan.

Dalam sub-bab berikut, kita akan membahas setiap kategori perangkat ini secara lebih rinci, mengeksplorasi berbagai jenis instrumen di dalamnya, beserta kekuatan, kelemahan, dan contoh penerapannya.

1. Pengaturan Input (*Input Controls*): Pembatasan Jumlah Alat Tangkap, Ukuran Kapal, dan Waktu Penangkapan

Pengaturan input adalah salah satu pendekatan paling tradisional dalam manajemen perikanan. Tujuannya adalah untuk mengontrol mortalitas penangkapan (F) dengan cara membatasi kapasitas total dari armada perikanan untuk menangkap ikan. Asumsi dasarnya adalah bahwa ada hubungan yang proporsional antara tingkat upaya penangkapan (E) dan mortalitas penangkapan yang dihasilkannya (F), yang dapat ditulis sebagai:

$$F=qE$$

dimana q adalah koefisien keterangkapan (*catchability coefficient*), yaitu parameter yang mengukur efisiensi dari satu unit upaya dalam menangkap ikan. Dengan membatasi E , manajer berharap dapat menjaga F pada tingkat target yang diinginkan. Ada tiga jenis utama pengaturan input:

a. Pembatasan Jumlah Unit Penangkapan (*Limited Entry*)

Ini adalah bentuk pengaturan input yang paling langsung. Metode ini mencoba untuk membatasi jumlah total "unit" yang diizinkan untuk berpartisipasi dalam suatu perikanan. Unit ini bisa berupa jumlah nelayan, jumlah kapal, atau jumlah alat tangkap.

- 1) Skema Izin Terbatas (*Limited License Schemes*): Pendekatan yang paling umum adalah dengan menetapkan jumlah maksimum izin atau lisensi yang akan dikeluarkan untuk suatu perikanan.

Setelah batas ini tercapai, tidak ada izin baru yang dikeluarkan (moratorium). Siapa pun yang ingin masuk ke perikanan tersebut harus membeli izin dari nelayan yang sudah ada yang ingin keluar.

- 2) Tujuan: Tujuan utamanya adalah untuk mencegah masalah "akses terbuka" (*open access*), di mana jumlah nelayan dan kapal terus bertambah tanpa batas, yang secara tak terhindarkan mengarah pada penangkapan berlebih secara biologis dan disipasi sewa ekonomi (*rent dissipation*). Dengan membatasi jumlah pemain, diharapkan setiap pemain yang tersisa dapat beroperasi secara lebih menguntungkan dan tekanan pada stok dapat dikendalikan.

Implementasi dan Tantangan Implementasi skema izin terbatas sering kali rumit secara politik dan sosial. Keputusan tentang siapa yang berhak mendapatkan izin awal (berdasarkan riwayat partisipasi, misalnya) dan siapa yang tidak, bisa sangat kontroversial.

Tantangan terbesar dari pendekatan ini adalah fenomena yang dikenal sebagai "capital stuffing" atau "penjejalan modal". Meskipun jumlah izin atau kapal mungkin dibatasi, tidak ada batasan pada seberapa canggih atau kuat setiap kapal tersebut. Nelayan, dalam persaingan satu sama lain untuk mendapatkan bagian terbesar dari hasil tangkapan, memiliki insentif yang kuat untuk meningkatkan kekuatan penangkapan dari unit mereka yang diizinkan. Mereka mungkin:

- 1) Memasang mesin yang lebih kuat.
- 2) Menggunakan alat bantu pencari ikan elektronik yang lebih canggih (sonar, GPS).
- 3) Menggunakan alat tangkap yang lebih besar atau lebih efisien.
- 4) Mempekerjakan kru yang lebih terampil.

Akibatnya, meskipun jumlah kapal tetap sama, upaya penangkapan efektif (*effective effort*) terus meningkat dari waktu ke waktu. Fenomena ini disebut "creep" teknologi (*technology creep*). Manajer mungkin berpikir bahwa mereka telah membekukan upaya, tetapi pada kenyataannya, F terus meningkat karena setiap unit upaya menjadi semakin efisien (nilai q meningkat). Kegagalan untuk memperhitungkan "creep" teknologi ini adalah salah satu alasan utama mengapa banyak skema pembatasan input

sederhana gagal dalam jangka panjang untuk mencegah penangkapan berlebih.

Mengatasi “Capital Stuffing”: Hak Upaya yang Dapat Ditransfer

Untuk mengatasi masalah “penjejalan modal” yang melekat pada skema izin terbatas sederhana, beberapa sistem manajemen telah bereksperimen dengan bentuk pengaturan input yang lebih canggih yang mencoba untuk mendefinisikan “upaya” secara lebih eksplisit. Salah satu contohnya adalah Hak Upaya Individual yang Dapat Ditransfer (*Individual Transferable Effort* - ITEs).

Dalam sistem ITE, alih-alih hanya membatasi jumlah kapal, manajer menetapkan Total Upaya yang Diizinkan (*Total Allowable Effort* - TAE) untuk seluruh perikanan. TAE ini dapat didefinisikan dalam unit seperti “hari-kapal” (*vessel-days*) atau “jam-pukat” (*trawl-hours*). Total upaya ini kemudian dibagi menjadi saham-saham individu (ITE) yang dialokasikan kepada para nelayan.

- 1) Contoh: Jika TAE untuk suatu perikanan ditetapkan sebesar 10.000 hari-kapal per tahun, dan ada 100 kapal, setiap kapal mungkin pada awalnya menerima ITE sebesar 100 hari-kapal.
- 2) Dapat Ditransfer (*Transferable*): Sama seperti kuota, saham upaya ini dapat dibeli dan dijual di antara para nelayan. Nelayan yang lebih efisien mungkin akan membeli hari-kapal tambahan dari nelayan yang kurang efisien, yang memungkinkan konsolidasi dan peningkatan efisiensi ekonomi.

Kelebihan ITE:

- 1) Mengontrol Upaya secara Langsung: Secara teori, ITE memberikan kontrol yang lebih langsung terhadap total upaya nominal yang diterapkan pada stok.
- 2) Fleksibilitas Ekonomi: Memberikan fleksibilitas bagi nelayan untuk menyesuaikan operasi mereka.

Kekurangan ITE: Meskipun merupakan perbaikan, sistem ITE tidak sepenuhnya kebal terhadap masalah “creep” teknologi. Masalahnya bergeser dari “seberapa besar kapal saya” menjadi “bagaimana saya bisa

menangkap ikan sebanyak mungkin dalam satu hari-kapal yang saya miliki?”. Nelayan masih memiliki insentif untuk meningkatkan efisiensi mereka dalam unit upaya yang dialokasikan. Sebuah “hari-kapal” dari kapal super-canggih pada tahun 2025 akan menghasilkan mortalitas penangkapan yang jauh lebih tinggi daripada “hari-kapal” dari kapal standar pada tahun 1995.

Oleh karena itu, sistem manajemen berbasis upaya harus secara terus-menerus memantau perubahan efisiensi (perubahan q) dan menyesuaikan Total Upaya yang Diizinkan (TAE) ke bawah dari waktu ke waktu untuk mengkompensasi “creep” teknologi. Ini adalah tugas yang menantang secara analitis dan sering kali sulit diterima secara politik oleh industri perikanan. Karena kesulitan-kesulitan inilah, banyak sistem manajemen telah beralih dari pengendalian input ke pengendalian output, meskipun pengaturan input tetap menjadi alat yang penting, terutama di perikanan yang miskin data.

b. Pembatasan Ukuran atau Kekuatan Kapal

Selain membatasi jumlah unit, jenis lain dari pengaturan input adalah dengan memberlakukan batasan pada atribut fisik dari unit-unit tersebut, terutama pada ukuran atau kekuatan kapal penangkap ikan. Tujuannya adalah untuk secara langsung membatasi kapasitas penangkapan dari setiap kapal individu.

Peraturan semacam ini dapat mengambil beberapa bentuk:

- 1) Pembatasan Panjang Keseluruhan (*Length Overall* - LOA): Menetapkan batas maksimum pada panjang kapal yang diizinkan untuk beroperasi di perikanan tertentu.
- 2) Pembatasan Tonase Kotor (*Gross Tonnage* - GT): Menetapkan batas maksimum pada volume internal total kapal. GT sering dianggap sebagai proksi yang lebih baik untuk kapasitas keseluruhan kapal (kemampuan membawa bahan bakar, perbekalan, kru, alat tangkap, dan hasil tangkapan) daripada hanya panjangnya.
- 3) Pembatasan Kekuatan Mesin (*Horsepower* - HP): Menetapkan batas maksimum pada kekuatan mesin utama kapal. Logikanya adalah bahwa mesin yang lebih kuat memungkinkan kapal untuk menarik

alat tangkap yang lebih besar (seperti pukot) dengan lebih cepat, atau untuk melakukan perjalanan lebih jauh dan lebih cepat ke daerah penangkapan.

Logika dan Penerapan Pembatasan ini sering kali diterapkan secara spesifik untuk segmen perikanan atau area tertentu. Misalnya, mungkin ada aturan bahwa hanya kapal di bawah 5 GT yang boleh beroperasi di perairan pesisir (misalnya, di bawah 4 mil laut) untuk melindungi perikanan skala kecil dan habitat pesisir. Kapal yang lebih besar mungkin hanya diizinkan untuk beroperasi di perairan yang lebih jauh di lepas pantai.

Tujuan dari pembatasan ini adalah untuk mencegah "perlombaan senjata" (*arms race*) dalam hal ukuran dan kekuatan kapal. Dengan menjaga armada pada tingkat teknologi atau kapasitas tertentu, manajer berharap dapat menjaga upaya penangkapan efektif tetap terkendali.

Tantangan dan Celah dalam Pembatasan Ukuran Kapal

Meskipun tampak lugas, pembatasan pada atribut fisik kapal juga menghadapi tantangan signifikan terkait dengan inovasi dan upaya nelayan untuk memaksimalkan kekuatan penangkapan mereka dalam batas-batas peraturan. Setiap aturan yang ditetapkan sering kali memicu "permainan kucing-dan-tikus" di mana para perancang kapal dan nelayan mencari cara-cara cerdas untuk mengakalinya.

- 1) Masalah dengan Pembatasan Panjang (LOA): Jika hanya panjang yang diatur, perancang kapal dapat mengkompensasinya dengan membuat kapal yang lebih lebar dan lebih dalam untuk panjang yang sama. Kapal "pendek tapi gemuk" ini dapat memiliki kapasitas dan stabilitas yang jauh lebih besar daripada yang dimaksudkan oleh peraturan.
- 2) Masalah dengan Pembatasan Tonase (GT): Pengukuran GT itu sendiri bisa rumit dan dapat dimanipulasi. Desain lambung tertentu atau penggunaan material yang berbeda dapat mengubah volume internal terukur tanpa secara signifikan mengurangi kapasitas penangkapan yang sebenarnya.
- 3) Masalah dengan Pembatasan Kekuatan Mesin (HP): Nelayan mungkin memasang mesin yang secara resmi memiliki rating HP di bawah batas, tetapi kemudian memodifikasinya untuk menghasilkan kekuatan yang

lebih besar. Selain itu, efisiensi baling-baling (*propeller*) dan desain hidrodinamik lambung dapat secara signifikan meningkatkan kekuatan penangkapan efektif bahkan dengan mesin yang sama.

Fenomena ini sekali lagi menyoroti masalah inti dari semua pengaturan input: sulitnya mendefinisikan dan mengontrol upaya penangkapan efektif. Upaya adalah konsep yang dinamis. Ia bukan hanya fungsi dari jumlah dan ukuran kapal, tetapi juga dari teknologi, keterampilan nelayan, dan informasi yang mereka miliki. Karena nelayan akan selalu berinovasi untuk meningkatkan efisiensi mereka, setiap sistem manajemen yang hanya mengandalkan pembatasan input statis pada akhirnya akan tertinggal dan gagal mengendalikan mortalitas penangkapan, kecuali jika pembatasan tersebut terus-menerus ditinjau dan diperketat untuk mengimbangi "creep" teknologi.

c. Pembatasan Waktu Penangkapan

Jenis ketiga dari pengaturan input adalah pembatasan pada jumlah waktu yang diizinkan bagi nelayan untuk menangkap ikan. Alih-alih membatasi jumlah atau ukuran kapal, pendekatan ini membatasi seberapa sering atau berapa lama kapal-kapal tersebut dapat digunakan.

Bentuk-bentuk umum dari pembatasan waktu penangkapan meliputi:

- 1) Pembatasan Hari di Laut (*Days-at-Sea Limits*): Setiap kapal atau nelayan dialokasikan sejumlah hari maksimum di mana mereka diizinkan untuk melakukan aktivitas penangkapan dalam satu tahun atau musim. Ini adalah inti dari skema ITE yang telah dibahas sebelumnya.
- 2) Penutupan Akhir Pekan atau Mingguan: Melarang semua aktivitas penangkapan pada hari-hari tertentu dalam seminggu (misalnya, dari Jumat malam hingga Minggu malam).
- 3) Pembatasan Jam Penangkapan: Hanya mengizinkan penangkapan selama jam-jam tertentu dalam sehari (misalnya, hanya pada siang hari).
- 4) Penutupan Musim (*Closed Seasons*): Ini adalah bentuk pembatasan waktu skala besar yang akan dibahas lebih lanjut sebagai peraturan teknis. Namun, ini juga dapat dilihat sebagai pengaturan input

karena secara langsung mengurangi total waktu penangkapan yang tersedia dalam setahun.

Logika dan Tujuan Logika di baliknya adalah bahwa dengan mengurangi jumlah waktu yang tersedia untuk menangkap ikan, total upaya penangkapan dan, akibatnya, mortalitas penangkapan akan berkurang secara proporsional. Pendekatan ini sering kali lebih mudah untuk diterapkan dan dipantau daripada skema izin terbatas yang kompleks, terutama jika ada pelabuhan pendaratan yang terbatas di mana kedatangan dan keberangkatan kapal dapat dicatat.

Tantangan Namun, pembatasan waktu juga memicu respons dari nelayan untuk memaksimalkan hasil tangkapan mereka dalam "jendela" waktu yang terbatas yang mereka miliki. Ini dapat mengarah pada:

- 1) "Perlombaan untuk Menangkap Ikan" dalam Skala Kecil: Nelayan akan mencoba untuk menangkap ikan seintensif mungkin selama hari-hari atau jam-jam yang diizinkan. Ini dapat mendorong investasi pada kapal yang lebih cepat dan alat tangkap yang lebih efisien untuk memaksimalkan hasil dalam waktu singkat.
- 2) Peningkatan Risiko Keselamatan: Ketika nelayan tahu bahwa waktu mereka terbatas, mereka mungkin akan tergoda untuk tetap melaut dan menangkap ikan bahkan dalam kondisi cuaca yang buruk, yang meningkatkan risiko kecelakaan.
- 3) Dampak Ekonomi: Pembatasan waktu yang ketat dapat membuat operasi menjadi tidak efisien secara ekonomi. Kapal dan kru mungkin akan menganggur untuk sebagian besar waktu, sementara modal yang mahal (kapal) tidak dimanfaatkan.

Secara keseluruhan, pengaturan input, dalam segala bentuknya, adalah alat yang berguna tetapi sering kali tumpul. Mereka mencoba untuk mengontrol F secara tidak langsung, tetapi sering kali gagal karena kemampuan industri perikanan untuk beradaptasi dan meningkatkan efisiensinya. Kesulitan dalam mengendalikan upaya penangkapan efektif inilah yang mendorong banyak sistem manajemen perikanan di seluruh dunia untuk beralih atau melengkapi pendekatan mereka dengan

pengaturan output, yang secara langsung mengontrol apa yang paling penting: jumlah ikan yang diambil dari laut.

2. Pengaturan Output (*Output Controls*): Kuota Tangkapan (TAC), Ukuran Ikan Minimum, Penutupan Musim/Daerah (*Closed Season/Area*)

Berbeda dengan pengaturan input yang mencoba mengontrol mortalitas penangkapan secara tidak langsung dengan membatasi upaya, pengaturan output mengambil pendekatan yang lebih langsung. Mereka bertujuan untuk mengontrol mortalitas penangkapan dengan cara menetapkan batas eksplisit pada jumlah total ikan yang boleh diambil dari suatu stok. Pendekatan ini secara teoritis lebih unggul karena ia langsung menargetkan variabel kunci (hasil tangkapan) yang ingin dikelola, terlepas dari seberapa besar atau efisien upaya yang digunakan untuk menangkapnya.

Jika manajer dapat menetapkan batas hasil tangkapan pada tingkat yang benar (berdasarkan pendugaan stok yang andal) dan berhasil menegakkannya, maka mereka dapat secara langsung mengontrol mortalitas penangkapan (F) dan menjaga stok pada tingkat yang diinginkan. Namun, seperti halnya pengaturan input, pengaturan output juga datang dengan serangkaian tantangan implementasi dan konsekuensi yang tidak diinginkan.

Bentuk pengaturan output yang paling penting dan paling umum adalah kuota hasil tangkapan. Selain itu, ada peraturan teknis lain yang juga berfungsi sebagai kontrol output, seperti batasan ukuran ikan minimum dan penutupan musim atau daerah, yang akan kita bahas dalam bagian ini.

a. Kuota Hasil Tangkapan (*Catch Quotas*)

Kuota hasil tangkapan adalah batas yang ditetapkan secara spesifik pada jumlah total (biasanya dalam berat, misalnya ton) dari suatu spesies ikan yang boleh ditangkap dari stok tertentu selama periode waktu tertentu (biasanya satu tahun). Ini adalah bentuk kontrol output yang paling langsung.

Prosesnya biasanya berjalan sebagai berikut:

- 1) **Pendugaan Stok:** Ilmuwan melakukan pendugaan stok untuk menentukan status stok saat ini dan merekomendasikan tingkat mortalitas penangkapan target (misalnya, $F_{0.1}$ atau FMSY).
- 2) **Penetapan Kuota:** Berdasarkan hasil pendugaan stok dan proyeksi, manajer menetapkan Total Hasil Tangkapan yang Diizinkan (*Total Allowable Catch* - TAC) untuk seluruh perikanan. TAC ini adalah kuota total untuk stok tersebut.
- 3) **Pemantauan:** Hasil tangkapan dari semua nelayan dan kapal dipantau secara ketat sepanjang tahun.
- 4) **Penutupan Perikanan:** Ketika total hasil tangkapan yang didaratkan mencapai TAC, perikanan untuk spesies tersebut akan ditutup untuk sisa tahun itu. Tidak ada lagi pendaratan yang diizinkan.

Kuota Tangkap Total (*Total Allowable Catch* - TAC) dan Masalah “Race to Fish”

Sistem yang hanya menggunakan TAC untuk seluruh perikanan (sering disebut *olympic-style fishery*) memiliki satu kelemahan fundamental yang sangat merusak, yang dikenal sebagai “perlombaan untuk menangkap ikan” (*race to fish*).

Dalam sistem ini, TAC adalah milik bersama. Setiap nelayan memiliki insentif yang sangat kuat untuk menangkap ikan sebanyak mungkin dan secepat mungkin sebelum nelayan lain melakukannya dan sebelum kuota total tercapai dan perikanan ditutup. Perlombaan ini menciptakan serangkaian konsekuensi negatif yang parah, baik secara ekonomi maupun sosial:

- 1) **Peningkatan Kapasitas Berlebih (*Overcapitalization*):** Untuk dapat bersaing dalam perlombaan, setiap nelayan harus berinvestasi dalam kapal yang lebih besar, mesin yang lebih kuat, dan alat tangkap yang lebih efisien. Hal ini menyebabkan penumpukan kapasitas penangkapan yang masif dalam armada, jauh melebihi apa yang sebenarnya dibutuhkan untuk menangkap TAC secara efisien.

- 2) Musim Penangkapan yang Sangat Singkat: Perlombaan ini sering kali menyebabkan TAC tercapai dalam periode waktu yang sangat singkat. Perikanan yang secara historis mungkin berlangsung selama 8-10 bulan dapat menyusut menjadi hanya beberapa minggu atau bahkan beberapa hari. Contoh ekstrem adalah beberapa perikanan halibut di Alaska sebelum reformasi, di mana musim penangkapan hanya berlangsung selama 24-48 jam.
- 3) Inefisiensi Ekonomi yang Parah: Kapal-kapal yang sangat mahal hanya digunakan untuk periode yang sangat singkat dalam setahun dan kemudian menganggur. Kualitas produk sering kali buruk karena semua ikan didaratkan secara bersamaan, membanjiri pasar dan fasilitas pengolahan. Harga ikan di tingkat nelayan anjlok karena pasokan yang melimpah dalam waktu singkat.
- 4) Peningkatan Risiko Keselamatan: Nelayan akan merasa tertekan untuk tetap melaut dan menangkap ikan dalam kondisi cuaca apa pun selama musim yang singkat itu, karena setiap hari yang hilang berarti kehilangan bagian dari hasil tangkapan. Hal ini secara dramatis meningkatkan risiko kecelakaan dan kematian di laut.
- 5) Pemantauan dan Penegakan yang Sulit: Sangat sulit bagi manajer untuk memantau hasil tangkapan secara *real-time* dan menutup perikanan tepat pada saat TAC tercapai. Sering kali, TAC akan terlampaui secara signifikan karena momentum dari perlombaan tersebut.

Meskipun TAC adalah alat yang diperlukan untuk menetapkan batas atas pada hasil tangkapan, ketika digunakan sebagai satu-satunya instrumen, ia menciptakan insentif yang salah yang mengarah pada inefisiensi ekonomi, bahaya, dan sering kali kegagalan konservasi. Masalah "race to fish" inilah yang mendorong pengembangan bentuk kuota yang lebih canggih: kuota individu.

Solusi untuk "Race to Fish": Kuota Hak Milik (*Rights-Based Quotas*)

Untuk mengatasi masalah "race to fish" yang merusak, banyak sistem manajemen perikanan di seluruh dunia telah beralih ke pendekatan berbasis hak (*rights-based management*), di mana sebagian dari hak untuk

menangkap ikan dialokasikan kepada entitas individu. Bentuk yang paling umum dari pendekatan ini adalah Kuota Individual (*Individual Quotas* - IQs).

Konsep Kuota Individual (IQ) Dalam sistem IQ, Total Hasil Tangkapan yang Diizinkan (TAC) tidak lagi menjadi milik bersama. Sebaliknya, TAC dibagi menjadi saham-saham yang lebih kecil yang dialokasikan kepada nelayan individu, kapal, komunitas, atau perusahaan. Setiap pemegang kuota dijamin memiliki hak eksklusif untuk menangkap sejumlah tertentu ikan.

- 1) Contoh: Jika TAC untuk perikanan kakap ditetapkan sebesar 1.000 ton, dan ada 100 nelayan yang berpartisipasi, setiap nelayan mungkin akan menerima IQ sebesar 10 ton.
- 2) Mengakhiri Perlombaan: Karena setiap nelayan sekarang memiliki bagian yang dijamin dari total hasil tangkapan, insentif untuk "berlomba" hilang. Nelayan tidak perlu lagi menangkap ikan secepat mungkin. Sebaliknya, mereka dapat merencanakan operasi mereka sepanjang tahun. Mereka dapat memilih untuk menangkap ikan pada saat kondisi cuaca baik, pada saat biaya operasi rendah, atau pada saat harga pasar sedang tinggi.

Kuota Individual yang Dapat Ditransfer (*Individual Transferable Quotas* - ITQs)

Sistem IQ menjadi lebih kuat dan fleksibel secara ekonomi ketika saham kuota tersebut dapat ditransfer (*transferable*), yaitu dapat disewakan, dibeli, dan dijual. Sistem ini dikenal sebagai ITQ.

- 1) Mekanisme Pasar: Kemampuan untuk mentransfer kuota menciptakan pasar untuk hak penangkapan. Nelayan yang lebih efisien dan menguntungkan dapat membeli kuota tambahan dari nelayan yang kurang efisien yang mungkin ingin pensiun atau beralih ke perikanan lain.
- 2) Peningkatan Efisiensi Ekonomi: Mekanisme pasar ini mendorong konsolidasi dan efisiensi dalam armada. Dalam jangka panjang, perikanan cenderung akan dioperasikan oleh jumlah kapal yang lebih optimal, yang masing-masing beroperasi secara lebih menguntungkan.

- 3) Insentif untuk Konservasi: Karena nelayan memiliki “saham” jangka panjang dalam kesehatan stok (nilai kuota mereka bergantung pada TAC di masa depan, yang bergantung pada kesehatan stok), mereka memiliki insentif yang lebih kuat untuk menjadi penjaga (*stewards*) dari sumber daya tersebut. Mereka lebih mungkin untuk mendukung langkah-langkah konservasi dan mematuhi peraturan.

Sistem ITQ telah diterapkan di banyak negara, termasuk Selandia Baru, Islandia, Australia, dan beberapa perikanan di Amerika Serikat, sering kali dengan keberhasilan yang signifikan dalam mengakhiri “race to fish” dan meningkatkan profitabilitas ekonomi.

Kelebihan dan Kekurangan Sistem Kuota Individual (IQ/ITQ)

Sistem kuota individual, terutama ITQ, sering dianggap sebagai “standar emas” dalam manajemen perikanan oleh banyak ekonom dan beberapa ilmuwan. Namun, mereka juga sangat kontroversial dan memiliki serangkaian potensi masalah sosial dan implementasi.

Kelebihan Utama:

- 1) Mengakhiri “Race to Fish”: Ini adalah keuntungan yang paling signifikan. Semua masalah yang terkait dengan perlombaan—musim yang singkat, kelebihan kapasitas, risiko keselamatan, kualitas produk yang buruk—dapat dihilangkan atau dikurangi secara drastis.
- 2) Peningkatan Efisiensi Ekonomi: Mendorong armada untuk menjadi lebih efisien secara ekonomi, yang dapat menghasilkan profitabilitas yang lebih tinggi bagi industri secara keseluruhan.
- 3) Peningkatan Keamanan dan Kualitas Produk: Nelayan dapat memilih untuk menangkap ikan dalam kondisi yang aman dan pada saat yang tepat untuk mendapatkan harga pasar terbaik.
- 4) Peningkatan Insentif untuk Penjagaan (*Stewardship*): Memberikan nelayan saham jangka panjang dalam kesehatan sumber daya, yang dapat meningkatkan dukungan mereka untuk konservasi.

Kekurangan dan Tantangan:

- 1) Masalah Alokasi Awal: Sama seperti izin terbatas, keputusan tentang bagaimana mengalokasikan saham kuota awal bisa sangat sulit dan kontroversial secara politik.
- 2) Konsolidasi dan Dampak Sosial: Salah satu kritik utama terhadap ITQ adalah bahwa mekanisme pasar dapat menyebabkan kuota terkonsolidasi di tangan beberapa perusahaan besar yang paling efisien. Hal ini dapat "mengusir" nelayan skala kecil atau independen dari perikanan, yang dapat memiliki dampak sosial yang merusak pada komunitas pesisir yang bergantung pada perikanan. Beberapa sistem mencoba mengatasi ini dengan menempatkan batas pada seberapa banyak kuota yang dapat dimiliki oleh satu entitas.
- 3) Masalah "High-Grading" dan Pembuangan (*Discarding*): Dalam sistem ITQ, setiap ikan yang didaratkan akan mengurangi sisa kuota nelayan. Hal ini menciptakan insentif ekonomi yang kuat bagi nelayan untuk hanya mendaratkan ikan yang paling berharga (misalnya, ikan yang berukuran paling besar dan memiliki harga pasar tertinggi) dan membuang ikan yang kurang berharga (misalnya, ikan yang lebih kecil dari spesies yang sama) kembali ke laut, meskipun ikan yang dibuang tersebut kemungkinan besar akan mati. Praktik ini, yang dikenal sebagai "high-grading", dapat menyebabkan mortalitas penangkapan yang tidak tercatat dan merusak data yang digunakan untuk pendugaan stok. Mengatasi masalah pembuangan ini memerlukan program pemantauan yang sangat ketat (seperti pengamat di atas kapal atau kamera elektronik) dan peraturan pendaratan yang kuat.
- 4) Biaya Implementasi dan Penegakan: Sistem kuota individual memerlukan sistem pemantauan dan pelaporan hasil tangkapan yang sangat canggih, akurat, dan hampir real-time untuk melacak hasil tangkapan setiap individu terhadap kuota mereka. Ini bisa sangat mahal untuk diimplementasikan dan ditegakkan.

Kesimpulannya, kuota hak milik seperti ITQ adalah alat manajemen yang sangat kuat yang dapat menyelesaikan masalah ekonomi yang parah dalam perikanan. Namun, mereka bukanlah obat mujarab. Desain dan implementasi sistem ITQ harus dilakukan dengan sangat hati-hati, dengan

perlindungan yang kuat untuk mengatasi potensi dampak sosial negatif dan masalah penegakan hukum seperti pembuangan hasil tangkapan.

b. Batasan Ukuran (*Size Limits*)

Selain mengontrol jumlah total hasil tangkapan, perangkat manajemen yang sangat umum digunakan adalah pemberlakuan batasan pada ukuran individu ikan yang boleh ditangkap dan didaratkan. Peraturan ini adalah bentuk kontrol output yang bersifat kualitatif; ia tidak membatasi berapa banyak ikan yang ditangkap, melainkan ikan yang mana yang boleh diambil dari populasi. Tujuan utama dari batasan ukuran adalah untuk memanipulasi pola mortalitas penangkapan (F) di seluruh rentang umur atau ukuran populasi, dengan tujuan untuk melindungi bagian-bagian tertentu dari stok yang dianggap paling penting untuk produktivitas dan kelestariannya.

Ada beberapa jenis batasan ukuran, tetapi yang paling umum adalah Batas Ukuran Minimum.

1) Batas Ukuran Minimum (*Minimum Size Limits* - MSL)

Ini adalah peraturan yang paling klasik dan paling banyak diterapkan di seluruh dunia. MSL menetapkan bahwa adalah ilegal untuk mendaratkan atau menjual ikan yang lebih kecil dari ukuran panjang tertentu (misalnya, panjang total atau panjang cagak). Ikan yang tertangkap di bawah ukuran ini (disebut *undersized*) secara hukum harus segera dikembalikan ke laut.

Logika Biologis: Dasar pemikiran di balik MSL berakar kuat pada dua pilar biologi perikanan yang telah kita bahas: reproduksi dan pertumbuhan.

- Melindungi Potensi Reproduksi: Tujuan utama dari MSL adalah untuk memberikan kesempatan bagi setiap individu ikan untuk bereproduksi setidaknya satu kali sebelum ia rentan untuk ditangkap secara legal. Ukuran minimum legal (L_c) biasanya ditetapkan pada atau sedikit di atas ukuran rata-rata saat pertama kali matang gonad (L_m). Dengan melakukan ini, kita memastikan bahwa bahkan jika seekor ikan ditangkap segera setelah mencapai ukuran legal, ia sudah sempat berkontribusi pada generasi berikutnya. Strategi “biarkan mereka memijah sekali” (*let them spawn once*) ini adalah jaring pengaman fundamental untuk

mencegah rekrutmen berlebih (*recruitment overfishing*), yaitu penipisan stok pemijah hingga tingkat di mana rekrutmen terganggu.

- Mencegah Pertumbuhan Berlebih (*Growth Overfishing*): MSL juga membantu memaksimalkan hasil per rekrut (YPR). Seperti yang ditunjukkan oleh analisis YPR, menangkap ikan pada saat mereka masih sangat kecil dan tumbuh dengan cepat adalah praktik yang boros. Dengan menunda penangkapan hingga ikan mencapai ukuran yang lebih besar, kita memungkinkan mereka untuk merealisasikan potensi pertumbuhan mereka. Total berat hasil tangkapan (*yield*) dari kohort akan jauh lebih besar jika individu-individu di dalamnya dibiarkan tumbuh terlebih dahulu. MSL secara efektif menggeser umur saat pertama kali ditangkap (*tc*) ke kanan, yang sering kali menggerakkan perikanan lebih dekat ke tingkat hasil per rekrut yang optimal.

Implementasi: MSL dapat ditegakkan melalui inspeksi di pelabuhan pendaratan. Namun, untuk menjadi benar-benar efektif, MSL idealnya harus dipasangkan dengan peraturan teknis pada alat tangkap (misalnya, ukuran mata jaring minimum) yang dirancang untuk menghindari penangkapan ikan *undersized* sejak awal.

Tantangan dalam Penerapan Batas Ukuran Minimum

Meskipun logikanya kuat, penerapan MSL di dunia nyata menghadapi beberapa tantangan signifikan, terutama masalah pembuangan hasil tangkapan (*discards*).

- Pembuangan Regulatori (*Regulatory Discarding*): Ketika alat tangkap (seperti pukat) tidak sepenuhnya selektif, ia akan menangkap ikan dari berbagai ukuran, termasuk ikan di bawah batas ukuran minimum legal. Karena nelayan tidak diizinkan untuk mendaratkan ikan-ikan *undersized* ini, mereka terpaksa untuk membuangnya kembali ke laut. Masalahnya adalah, banyak dari ikan yang dibuang ini sudah mati atau sekarat karena stres, cedera, atau perubahan tekanan selama proses penangkapan. Fenomena ini dikenal sebagai mortalitas pembuangan (*discard mortality*).
- Mortalitas Tak Tercatat: Mortalitas pembuangan ini adalah bentuk mortalitas penangkapan yang tersembunyi dan tidak tercatat. Jika

tingkatnya tinggi, maka mortalitas penangkapan total yang sebenarnya dialami oleh stok bisa jadi jauh lebih tinggi daripada yang ditunjukkan oleh data pendaratan saja. Hal ini dapat menyebabkan ilmuwan meremehkan dampak sebenarnya dari perikanan dan memberikan nasihat yang terlalu optimis.

- Pemborosan Sumber Daya: Membuang ikan mati kembali ke laut adalah pemborosan sumber daya protein yang nyata.

Untuk mengatasi masalah pembuangan ini, beberapa sistem manajemen telah menerapkan pendekatan yang lebih drastis, seperti larangan pembuangan (*discard bans*) atau kebijakan "wajib darat" (*landing obligation*). Dalam sistem ini, nelayan diwajibkan untuk mendaratkan semua ikan yang mereka tangkap, terlepas dari ukurannya. Ikan *undersized* yang didaratkan mungkin tidak boleh dijual untuk konsumsi manusia tetapi dapat digunakan untuk tujuan lain (misalnya, pakan ikan), dan jumlahnya akan dihitung terhadap kuota nelayan. Tujuannya adalah untuk menciptakan insentif yang sangat kuat bagi nelayan untuk menggunakan alat tangkap yang lebih selektif dan menghindari area di mana ikan-ikan kecil melimpah, karena menangkap mereka menjadi tidak menguntungkan.

2) Batas Ukuran Maksimum dan Kuota Slot (*Maximum Size Limits & Slot Limits*)

Jika batas ukuran minimum melindungi ikan muda, maka batas ukuran maksimum (*Maximum Size Limits*) dirancang untuk melindungi ikan yang paling besar dan paling tua dalam populasi. Peraturan ini melarang penangkapan ikan yang lebih besar dari ukuran tertentu.

Logika Biologis: Dasar pemikiran untuk melindungi ikan besar berakar pada pemahaman modern tentang pentingnya struktur umur populasi dan kontribusi reproduktif yang tidak proporsional dari individu-individu tua. Seperti yang telah dibahas, ikan-ikan ini, yang sering dijuluki BOFFFFs (*Big, Old, Fat, Fecund, Female Fish*), sangat berharga bagi kesehatan stok karena beberapa alasan:

- Fekunditas Eksponensial: Fekunditas (jumlah telur) meningkat secara eksponensial dengan ukuran. Seekor ikan betina besar dapat menghasilkan telur berkali-kali lipat, atau bahkan puluhan kali lipat,

lebih banyak daripada ikan betina yang lebih kecil yang baru pertama kali matang.

- Kualitas Telur yang Lebih Baik: Penelitian telah menunjukkan bahwa telur dari betina yang lebih tua dan lebih besar sering kali memiliki kualitas yang lebih baik. Mereka cenderung memiliki ukuran yang lebih besar dan kandungan lipid (energi) yang lebih tinggi, yang menghasilkan larva dengan tingkat kelangsungan hidup yang lebih baik.
- Musim Pemijahan yang Lebih Panjang: Ikan yang lebih tua mungkin memiliki musim pemijahan yang lebih panjang atau memijah beberapa kali dalam satu musim, yang menyebarkan risiko dan meningkatkan kemungkinan bahwa beberapa keturunan mereka akan bertemu dengan kondisi lingkungan yang menguntungkan.
- “Memori” Genetik: Ikan tua adalah penyintas. Mereka telah berhasil melewati berbagai kondisi lingkungan yang baik dan buruk. Genotipe mereka mungkin membawa adaptasi penting yang berharga bagi ketahanan jangka panjang populasi dalam menghadapi perubahan lingkungan.

Menghilangkan semua ikan besar dari populasi melalui penangkapan yang selektif ukuran (fenomena yang disebut *size-selective fishing*) dapat secara drastis mengurangi potensi reproduktif total stok dan menghilangkan “asuransi” biologis yang mereka sediakan.

Kuota Slot (*Slot Limits*) Batas ukuran maksimum sering kali digabungkan dengan batas ukuran minimum untuk menciptakan apa yang disebut kuota slot (*slot limit*). Peraturan ini hanya mengizinkan penangkapan ikan yang berada di dalam “slot” atau rentang ukuran tertentu. Ikan yang lebih kecil dari batas minimum DAN ikan yang lebih besar dari batas maksimum harus dilepaskan. Pendekatan ini secara simultan bertujuan untuk membiarkan ikan muda tumbuh dan bereproduksi, sambil secara aktif melindungi individu-individu pemijah yang paling berharga dan produktif. Kuota slot sangat umum dalam pengelolaan perikanan rekreasi dan semakin dipertimbangkan untuk perikanan komersial, terutama untuk spesies yang hidup lama dan rentan.

3. Penutupan Musim dan/atau Daerah (*Closed Seasons and/or Areas*)

Perangkat manajemen ini adalah bentuk peraturan teknis yang mengontrol kapan dan di mana penangkapan ikan boleh terjadi. Tujuannya adalah untuk melindungi stok selama periode atau di lokasi yang paling rentan dalam siklus hidupnya. Dengan melarang penangkapan pada waktu atau tempat yang kritis, kita dapat secara signifikan mengurangi mortalitas pada tahap-tahap kehidupan yang paling penting untuk keberhasilan reproduksi dan kelangsungan hidup populasi.

Meskipun dapat dilihat sebagai bentuk pembatasan waktu atau ruang pada upaya penangkapan (pengaturan input), penutupan ini sering kali dianggap sebagai kontrol output karena efek utamanya adalah untuk secara langsung mengurangi penangkapan pada segmen populasi tertentu (misalnya, ikan yang sedang memijah atau yuwana). Logikanya adalah bahwa melindungi ikan pada saat-saat paling rentan akan menghasilkan output populasi yang lebih besar di masa depan (lebih banyak rekrut dan biomassa).

Ada dua jenis utama dari penutupan ini:

- a. Penutupan Musim (*Temporal Closures*): Melarang penangkapan selama periode waktu tertentu dalam setahun.
- b. Penutupan Daerah (*Spatial Closures*): Melarang penangkapan di area geografis tertentu secara permanen atau musiman.

Kedua pendekatan ini sering kali digunakan bersamaan. Misalnya, suatu area pemijahan penting mungkin akan ditutup untuk semua aktivitas penangkapan selama puncak musim pemijahan.

Dasar Ilmiah untuk Penutupan Implementasi dari penutupan ini sangat bergantung pada informasi biologis yang detail yang diperoleh dari jenis-jenis studi yang telah kita bahas di bab-bab sebelumnya:

- a. Studi Reproduksi: Data tentang siklus bulanan Indeks Kematangan Gonad (IKG) sangat penting untuk mengidentifikasi puncak musim pemijahan secara akurat. Ini menjadi dasar untuk menetapkan waktu penutupan musim.

- b. Studi Migrasi dan Agregasi: Informasi dari studi penandaan atau wawancara dengan nelayan dapat membantu mengidentifikasi lokasi-lokasi spesifik di mana ikan berkumpul dalam kepadatan tinggi untuk memijah. Ini adalah area agregasi pemijahan (*spawning aggregation sites*) yang menjadi kandidat utama untuk penutupan daerah.
- c. Identifikasi Habitat Kritis: Survei ilmiah (misalnya, survei telur dan larva, atau survei bawah air) digunakan untuk memetakan habitat asuhan (*nursery grounds*) yang penting bagi yuwana (seperti hutan bakau, padang lamun, atau estuari) dan habitat pakan (*feeding grounds*) utama. Area-area ini juga merupakan kandidat untuk penutupan.

Tanpa informasi biologis yang solid ini, penetapan waktu dan lokasi penutupan akan menjadi tebak-tebakan dan kemungkinan besar tidak akan efektif.

a. Penutupan Musim (*Closed Seasons*)

Penutupan musim adalah larangan penangkapan ikan untuk spesies tertentu (atau semua spesies) selama periode waktu yang telah ditentukan dalam setahun.

Tujuan Utama: Tujuan yang paling umum dari penutupan musim adalah untuk melindungi ikan selama puncak musim reproduksi mereka. Banyak spesies ikan membentuk agregasi pemijahan yang padat dan dapat diprediksi, di mana mereka menjadi sangat rentan terhadap alat tangkap. Selama periode ini, perilaku mereka lebih fokus pada reproduksi daripada menghindari bahaya, dan mereka terkonsentrasi di area yang kecil. Menangkap ikan pada saat ini tidak hanya menghilangkan sejumlah besar individu dewasa yang siap memijah, tetapi juga dapat mengganggu perilaku kawin dan mengurangi keberhasilan pembuahan secara keseluruhan.

Dengan melarang penangkapan selama periode puncak pemijahan, manajemen bertujuan untuk:

- 1) Memaksimalkan Pelepasan Telur (*Egg Production*): Memastikan bahwa sebanyak mungkin ikan dewasa dapat melepaskan gamet mereka tanpa gangguan.
- 2) Melindungi Stok Induk: Mengurangi mortalitas penangkapan pada bagian populasi yang paling penting untuk regenerasi di masa depan.

Contoh Penerapan:

- 1) Perikanan Udang: Banyak perikanan udang menerapkan penutupan musim. Ini sering kali dirancang untuk melindungi udang yuwana saat mereka tumbuh di estuari sebelum bermigrasi ke laut, atau untuk melindungi udang dewasa selama puncak musim pemijahan mereka.
- 2) Perikanan Ikan Karang: Untuk spesies seperti kerapu yang membentuk agregasi pemijahan yang sangat dapat diprediksi, penutupan musim selama 1-2 bulan puncak pemijahan adalah alat manajemen yang sangat penting dan efektif.

Kelebihan Penutupan Musim:

- 1) Efektif secara Biologis: Jika waktu penutupan ditetapkan dengan benar agar sesuai dengan puncak musim pemijahan, ini bisa menjadi cara yang sangat efektif untuk melindungi potensi reproduktif stok.
- 2) Relatif Mudah Ditegakkan: Dibandingkan dengan peraturan lain yang rumit, larangan total terhadap penangkapan selama periode tertentu relatif lebih mudah untuk dikomunikasikan dan dipantau.

Kekurangan dan Tantangan:

- 1) Dampak Ekonomi Jangka Pendek: Penutupan musim secara langsung mempengaruhi pendapatan nelayan selama periode tersebut. Hal ini dapat menimbulkan kesulitan ekonomi dan resistensi dari industri jika tidak ada sumber pendapatan alternatif.
- 2) Pergeseran Upaya (*Effort Displacement*): Jika penutupan hanya berlaku untuk satu spesies, nelayan mungkin akan mengalihkan upaya mereka dan memberikan tekanan yang lebih besar pada spesies lain selama periode penutupan.
- 3) "Perlombaan" Sebelum dan Sesudah Penutupan: Penutupan musim dapat menciptakan "efek hari pembukaan", di mana terjadi perlombaan yang intensif untuk menangkap ikan tepat sebelum musim ditutup dan segera setelah musim dibuka kembali. Hal ini dapat menciptakan masalah keamanan dan membanjiri pasar, mirip dengan masalah "race to fish" pada kuota total.

Meskipun ada tantangan ini, penutupan musim tetap menjadi salah satu alat manajemen yang paling banyak digunakan dan paling efektif, terutama ketika tujuan utamanya adalah untuk melindungi proses reproduksi yang kritis.

b. Penutupan Daerah (*Spatial Closures / Closed Areas*)

Penutupan daerah adalah peraturan yang melarang atau membatasi aktivitas penangkapan ikan di dalam batas-batas geografis tertentu. Penutupan ini bisa bersifat permanen atau musiman. Ketika penutupan bersifat permanen dan bertujuan untuk konservasi jangka panjang, area tersebut sering disebut sebagai Kawasan Konservasi Perairan (KKP), Kawasan Perlindungan Laut (KPL), atau *Marine Protected Area* (MPA).

Tujuan Utama: Tujuan dari penutupan daerah lebih beragam daripada penutupan musim dan dapat mencakup:

- 1) Melindungi Habitat Pemijahan dan Agregasi: Mirip dengan penutupan musim, tetapi dengan fokus spasial. Area yang diketahui sebagai lokasi agregasi pemijahan utama dapat ditutup secara permanen atau selama musim pemijahan untuk memberikan perlindungan penuh pada proses reproduksi.
- 2) Melindungi Habitat Asuhan (Nursery Grounds): Area seperti estuari, hutan bakau, dan padang lamun sering kali berfungsi sebagai "kamar bayi" bagi banyak spesies ikan komersial. Area ini menyediakan makanan yang melimpah dan perlindungan dari predator bagi ikan yuwana. Melarang penggunaan alat tangkap yang merusak (seperti pukat) di area-area ini sangat penting untuk memastikan kelangsungan hidup yuwana hingga mereka cukup besar untuk direkrut ke dalam populasi dewasa.
- 3) Menciptakan Suaka atau Perlindungan (Refugia): Dengan menutup suatu area dari semua aktivitas penangkapan secara permanen (sering disebut no-take zone), kita menciptakan suaka di mana ikan dapat hidup dan tumbuh tanpa tekanan penangkapan. Di dalam area ini, populasi ikan diharapkan dapat kembali ke kondisi yang lebih alami, dengan biomassa yang lebih tinggi dan struktur umur yang lebih lengkap (termasuk banyak ikan besar dan tua).

- 4) Melindungi Keanekaragaman Hayati dan Fungsi Ekosistem: MPA sering kali dirancang tidak hanya untuk satu spesies, tetapi untuk melindungi seluruh komunitas dan habitat, seperti ekosistem terumbu karang yang kompleks.
- 5) Memisahkan Konflik Alat Tangkap: Penutupan daerah dapat digunakan untuk memisahkan pengguna alat tangkap yang tidak kompatibel, misalnya dengan menetapkan zona khusus untuk nelayan pancing tradisional dan melarang penggunaan pukat di zona tersebut.

Manfaat Potensial dari Kawasan Perlindungan Laut (MPA)

MPA yang dirancang dan dikelola dengan baik dapat memberikan manfaat yang melampaui batas-batasnya sendiri, yang berpotensi menguntungkan perikanan di sekitarnya. Dua mekanisme utama yang diharapkan adalah "efek limpahan" dan "ekspor larva".

1) Efek Limpahan (*Spillover Effect*)

- Konsep: Seiring dengan pulihnya populasi ikan di dalam MPA yang tidak boleh dimasuki (*no-take zone*), kepadatan dan biomassa ikan di dalamnya akan meningkat. Ketika kepadatan menjadi sangat tinggi, kompetisi untuk makanan dan ruang akan meningkat. Akibatnya, beberapa ikan, terutama ikan dewasa dan sub-dewasa, akan cenderung bergerak keluar dari batas MPA ke area penangkapan di sekitarnya. Pergerakan keluar dari ikan yang dapat ditangkap ini disebut efek limpahan.
- Manfaat bagi Perikanan: Nelayan sering kali melaporkan bahwa hasil tangkapan mereka meningkat ketika mereka memancing tepat di sepanjang batas MPA. "Memancing di garis batas" (*fishing the line*) menjadi strategi yang umum. Efek limpahan ini secara efektif "mengisi kembali" stok di area penangkapan yang berdekatan, yang dapat membantu menopang hasil tangkapan lokal.

2) Ekspor Larva (*Larval Export*)

- Konsep: Manfaat yang mungkin lebih signifikan, meskipun lebih sulit diukur, adalah ekspor telur dan larva. Karena MPA melindungi populasi pemijah yang sehat dan besar (termasuk banyak BOFFFFs),

MPA dapat berfungsi sebagai “mesin” produksi telur dan larva yang sangat produktif. Sebagian besar telur dan larva ini bersifat planktonik dan akan terbawa oleh arus keluar dari batas MPA.

- Manfaat bagi Perikanan: Larva-larva ini kemudian dapat “menetap” dan mengisi kembali (*replenish*) populasi di area penangkapan yang luas, bahkan yang berjarak puluhan atau ratusan kilometer, tergantung pada pola arus dan durasi tahap larva. Dengan demikian, MPA tidak hanya melindungi populasi di dalamnya, tetapi juga dapat berfungsi sebagai sumber rekrutmen yang penting untuk seluruh jaringan populasi di suatu wilayah (metapopulasi).

Karena potensi manfaat ganda ini (limpahan ikan dewasa dan ekspor larva), MPA semakin dilihat bukan hanya sebagai alat konservasi, tetapi juga sebagai alat manajemen perikanan yang penting. Mereka adalah bentuk “asuransi” ekologis yang dapat meningkatkan ketahanan stok perikanan secara keseluruhan terhadap tekanan penangkapan dan variabilitas lingkungan.

Tantangan dalam Desain dan Implementasi MPA

Meskipun memiliki potensi besar, keberhasilan MPA sangat bergantung pada desain dan implementasi yang cermat. MPA yang dirancang dengan buruk atau tidak ditegakkan tidak akan memberikan manfaat yang diharapkan.

Pertimbangan Desain Ilmiah:

- 1) Ukuran: MPA harus cukup besar untuk melindungi populasi yang tinggal di dalamnya (terutama untuk spesies yang memiliki rentang jelajah yang luas), tetapi tidak terlalu besar sehingga menimbulkan dampak ekonomi yang tidak dapat diterima oleh komunitas lokal.
- 2) Lokasi: Lokasi adalah kunci. MPA harus ditempatkan di area yang secara biologis paling penting. Ini memerlukan identifikasi dan pemetaan habitat kritis seperti agregasi pemijahan, area asuhan, dan hotspot keanekaragaman hayati. Pengetahuan tentang konektivitas (pola penyebaran larva) juga penting untuk merancang jaringan MPA

(network of MPAs) yang saling terhubung dan mendukung satu sama lain.

- 3) Bentuk dan Jarak: Bentuk MPA dan jarak antar MPA dalam sebuah jaringan juga mempengaruhi efektivitasnya.

Tantangan Implementasi:

- Dukungan Pemangku Kepentingan: Keberhasilan jangka panjang dari setiap MPA sangat bergantung pada penerimaan dan dukungan dari para pemangku kepentingan lokal, terutama komunitas nelayan yang paling terkena dampaknya. Proses perencanaan yang partisipatif, yang melibatkan nelayan sejak awal, sangat penting untuk mengurangi konflik dan meningkatkan kepatuhan.
- Biaya Ekonomi Jangka Pendek: Penutupan suatu area untuk penangkapan ikan secara inheren akan menyebabkan perpindahan upaya penangkapan dan potensi kerugian ekonomi jangka pendek bagi nelayan yang secara historis bergantung pada area tersebut. Rencana manajemen harus mempertimbangkan dampak ini dan jika mungkin, menyediakan mata pencaharian alternatif atau bentuk kompensasi lainnya.
- Penegakan Hukum (*Enforcement*): MPA hanya akan berfungsi jika peraturannya ditegakkan. "MPA kertas" (*paper park*) yang ada di peta tetapi tidak ada patroli atau pengawasan di lapangan tidak akan memberikan manfaat ekologis. Penegakan hukum memerlukan sumber daya keuangan dan personel yang signifikan, yang bisa menjadi tantangan besar, terutama di negara berkembang dengan wilayah perairan yang luas.

Secara keseluruhan, penutupan daerah, terutama melalui jaringan MPA yang dirancang dengan baik, adalah salah satu alat paling ampuh yang kita miliki untuk mencapai tujuan ganda konservasi keanekaragaman hayati dan pengelolaan perikanan yang berkelanjutan.

C. Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (EAFM)

Setelah membahas berbagai perangkat manajemen yang berfokus pada stok target tunggal, kita sekarang beralih ke kerangka kerja yang

lebih holistik dan terintegrasi yang telah menjadi paradigma dominan dalam pemikiran manajemen perikanan modern: Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (*Ecosystem Approach to Fisheries Management* - EAFM).

EAFM adalah sebuah evolusi dari manajemen perikanan tradisional. Ia lahir dari kesadaran yang semakin meningkat bahwa pendekatan spesies tunggal, yang mengabaikan interaksi ekologis dan dampak yang lebih luas, sering kali tidak cukup untuk menjamin keberlanjutan jangka panjang. Perikanan tidak beroperasi dalam ruang hampa; mereka adalah bagian integral dari ekosistem laut yang kompleks. Aktivitas penangkapan tidak hanya berdampak pada spesies target, tetapi juga pada spesies lain, habitat fisik, dan jaring-jaring makanan secara keseluruhan. Sebaliknya, kesehatan dan produktivitas stok target itu sendiri sangat bergantung pada kesehatan ekosistem yang menopangnya.

Definisi EAFM Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia (FAO) mendefinisikan EAFM sebagai: "Pendekatan yang berupaya untuk menyeimbangkan berbagai tujuan masyarakat, dengan cara mengelola perikanan dalam suatu kerangka kerja yang juga mempertimbangkan pengetahuan dan ketidakpastian tentang komponen biotik, abiotik, dan manusia dari ekosistem."

Definisi ini menyoroti tiga pergeseran fundamental dari manajemen tradisional:

1. Fokus yang Diperluas: Fokusnya diperluas dari hanya spesies target menjadi seluruh ekosistem. Ini termasuk mempertimbangkan dampak pada spesies non-target (*bycatch*), spesies yang bergantung secara ekologis (predator dan mangsa), dan habitat.
2. Tujuan yang Diperluas: Tujuannya diperluas dari hanya memaksimalkan hasil tangkapan menjadi menyeimbangkan tujuan ekologis, sosial, dan ekonomi. EAFM secara eksplisit mengakui adanya *trade-offs* dan berusaha untuk mengelolanya.
3. Proses yang Diperluas: Proses pengambilan keputusan diperluas untuk melibatkan semua pemangku kepentingan (stakeholders) secara lebih luas dan untuk secara eksplisit memasukkan pertimbangan tentang

manusia (nelayan, komunitas, institusi) sebagai bagian dari sistem yang dikelola.

EAFM bukanlah pengganti dari manajemen spesies tunggal, melainkan sebuah kerangka kerja yang melingkupinya. Penilaian stok spesies tunggal yang baik tetap menjadi komponen inti dari EAFM. Namun, EAFM menempatkan penilaian tersebut dalam konteks ekologis dan sosial yang lebih luas, dan menambahkan pertimbangan-pertimbangan baru ke dalam proses pengambilan keputusan.

Prinsip-prinsip Kunci EAFM

Implementasi EAFM dipandu oleh serangkaian prinsip kunci yang mencerminkan sifatnya yang holistik dan terintegrasi.

1. **Pengelolaan Harus Berbasis pada Batas-batas Ekologis:** Jika memungkinkan, unit pengelolaan harus didefinisikan berdasarkan batas-batas ekosistem (misalnya, *Large Marine Ecosystem* - LME), bukan hanya batas-batas administratif.
2. **Mempertahankan Struktur dan Fungsi Ekosistem:** Tujuannya bukan hanya untuk menjaga agar stok target tidak habis, tetapi juga untuk memastikan bahwa struktur (misalnya, keanekaragaman spesies, struktur ukuran populasi) dan fungsi (misalnya, aliran energi, siklus nutrien) dari ekosistem tidak terganggu secara fundamental. Ini berarti menghindari dampak seperti *fishing down the food web*.
3. **Memperhitungkan Interaksi Spesies:** EAFM secara eksplisit mempertimbangkan hubungan predator-mangsa dan kompetisi. Misalnya, saat menetapkan kuota untuk ikan pakan (seperti sarden), kebutuhan makanan dari predatornya (seperti tuna, lumba-lumba, dan burung laut) harus diperhitungkan.
4. **Meminimalkan Dampak Perikanan yang Merusak:** Ini mencakup upaya aktif untuk mengurangi bycatch melalui pengembangan alat tangkap yang lebih selektif dan untuk melindungi habitat sensitif dari kerusakan oleh alat tangkap yang bersentuhan dengan dasar laut.
5. **Kompatibilitas Lintas Sektor:** Mengakui bahwa perikanan hanyalah salah satu dari banyak aktivitas manusia yang mempengaruhi ekosistem laut. EAFM berusaha untuk mengkoordinasikan manajemen perikanan

dengan manajemen sektor lain, seperti perkapalan, pariwisata, pertambangan lepas pantai, dan pengelolaan polusi dari darat.

6. Pengambilan Keputusan yang Partisipatif dan Transparan: EAFM menekankan pentingnya melibatkan semua pemangku kepentingan (nelayan industri dan skala kecil, ilmuwan, manajer, LSM lingkungan, komunitas lokal) dalam proses penetapan tujuan dan pengambilan keputusan.
7. Penerapan Pendekatan Kehati-hatian (Precautionary Approach): Mengingat kompleksitas dan ketidakpastian yang melekat dalam sistem ekosistem, EAFM sangat menganut pendekatan kehati-hatian. Ini berarti bahwa ketiadaan informasi ilmiah yang lengkap tidak boleh digunakan sebagai alasan untuk menunda tindakan konservasi dan pengelolaan yang diperlukan untuk mencegah kerusakan serius pada sumber daya atau ekosistem. Beban pembuktian sering kali dibalik: aktivitas perikanan harus menunjukkan bahwa ia tidak akan menyebabkan kerusakan, daripada konservasi harus membuktikan bahwa kerusakan sedang terjadi.

Peralihan ke EAFM adalah sebuah proses yang menantang dan bertahap. Ia memerlukan lebih banyak data, pemahaman ekologis yang lebih dalam, dan institusi yang mampu mengelola konflik dan *trade-offs* yang kompleks. Namun, ini adalah arah yang harus dituju jika kita ingin memastikan bahwa perikanan tidak hanya produktif, tetapi juga benar-benar berkelanjutan dalam jangka panjang, baik bagi alam maupun bagi manusia.

Setelah menjelajahi konsep-konsep teoretis dan metodologis yang menjadi fondasi biologi perikanan, penting untuk melihat bagaimana ilmu ini diterapkan dalam konteks nyata di perairan Indonesia. Nusantara, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dan pusat keanekaragaman hayati laut global, menyajikan serangkaian tantangan dan peluang yang unik untuk manajemen perikanan. Perikanan di Indonesia sangat beragam, mulai dari perikanan industri skala besar yang menargetkan tuna di samudra lepas, hingga perikanan skala kecil multi-spesies dan multi-alat tangkap yang menjadi tulang punggung kehidupan jutaan masyarakat pesisir.

Menerapkan prinsip-prinsip biologi perikanan yang sering kali dikembangkan di daerah beriklim sedang ke dalam konteks tropis yang sangat kompleks ini bukanlah tugas yang mudah. Ikan tropis sering kali memiliki siklus hidup yang berbeda (misalnya, memijah sepanjang tahun), umurnya lebih sulit ditentukan, dan perikanannya sering kali bersifat multi-spesies, di mana puluhan atau bahkan ratusan spesies ditangkap secara bersamaan. Selain itu, banyak perikanan di Indonesia menghadapi tantangan berupa "kemiskinan data" (*data-poor*), di mana data ilmiah jangka panjang yang diperlukan untuk model-model pendugaan stok konvensional masih terbatas.

Bab ini bertujuan untuk memberikan gambaran tentang bagaimana biologi perikanan diterapkan untuk memahami dan mengelola beberapa perikanan paling penting di Indonesia. Kita akan melihat dua studi kasus utama yang mewakili dua kelompok ekologis yang berbeda: perikanan ikan pelagis kecil, dengan contoh ikan lemuru di Selat Bali yang sangat dipengaruhi oleh dinamika iklim, dan perikanan ikan demersal, dengan contoh kakap dan kerapu yang menyoroti tantangan pengelolaan spesies yang hidup lama dan membentuk agregasi pemijahan. Melalui studi kasus ini, kita dapat melihat bagaimana konsep-konsep seperti pertumbuhan,

reproduksi, mortalitas, dan pengaruh lingkungan menjadi hidup dan relevan dalam upaya mencapai perikanan yang berkelanjutan di Indonesia. Terakhir, kita akan merangkum beberapa tantangan utama dan arah masa depan untuk ilmu biologi perikanan di negara ini.

A. Studi Kasus Perikanan Pelagis Kecil (Contoh: Ikan Lemuru di Selat Bali)

Perikanan ikan pelagis kecil—yang mencakup spesies seperti sarden, teri, kembung, dan layang—merupakan salah satu pilar utama ketahanan pangan dan ekonomi perikanan di Indonesia. Ikan-ikan ini, meskipun ukurannya kecil, ditangkap dalam volume yang sangat besar dan menjadi sumber protein hewani yang terjangkau bagi sebagian besar masyarakat. Selain itu, mereka memainkan peran ekologis yang sangat penting sebagai penghubung utama antara produksi primer (plankton) dan predator tingkat tinggi (seperti tuna, mamalia laut, dan manusia).

Salah satu contoh perikanan pelagis kecil yang paling ikonik dan paling banyak dipelajari di Indonesia adalah perikanan ikan lemuru (*Sardinella lemuru*) yang berpusat di Selat Bali. Studi kasus ini memberikan pelajaran yang sangat berharga tentang bagaimana dinamika suatu stok ikan dapat sangat dipengaruhi oleh variabilitas iklim skala besar, dan bagaimana manajemen harus beradaptasi dengan ketidakpastian ini.

1. Latar Belakang dan Pentingnya Perikanan Lemuru

Biologi Ikan Lemuru: Ikan lemuru, juga dikenal sebagai Sardin Minyak Bali (Bali *Sardinella*), adalah spesies ikan pelagis kecil dari famili Clupeidae. Mereka adalah ikan pembentuk gerombolan (*schooling*) yang padat, memakan fitoplankton dan zooplankton (herbivora/konsumen primer), dan memiliki siklus hidup yang relatif singkat (biasanya hidup hingga 2-3 tahun). Karakteristik sejarah kehidupan “hidup cepat, mati muda” ini (K tinggi, L_{∞} kecil) membuat populasi mereka secara inheren sangat dinamis dan produktif, tetapi juga sangat rentan terhadap fluktuasi lingkungan.

Pentingnya Perikanan: Perikanan lemuru di Selat Bali telah menjadi perikanan komersial yang sangat penting sejak awal abad ke-20. Pusat pendaratan utamanya berada di Muncar, Jawa Timur, dan Pengambengan,

Bali. Selama bertahun-tahun, perikanan ini telah menopang industri pengalengan sarden yang besar, menyediakan ribuan lapangan kerja, dan menjadi sumber pendapatan utama bagi komunitas nelayan lokal. Alat tangkap utama yang digunakan untuk menangkap lemuru adalah pukat cincin (*purse seine*), yang sangat efektif dalam menargetkan gerombolan ikan yang padat.

Sejarah Fluktuasi Hasil Tangkapan: Sejarah perikanan lemuru ditandai oleh fluktuasi hasil tangkapan yang sangat dramatis. Data pendaratan jangka panjang menunjukkan siklus “boom-and-bust” (ledakan dan keruntuhan) yang berulang. Ada periode di mana hasil tangkapan sangat melimpah, diikuti oleh periode di mana hasil tangkapan anjlok secara drastis, menyebabkan krisis ekonomi dan sosial yang parah bagi industri dan komunitas yang bergantung padanya. Contohnya, perikanan ini pernah mengalami keruntuhan pada pertengahan tahun 1970-an dan lagi pada akhir 1990-an. Fluktuasi yang ekstrem ini memicu banyak penelitian ilmiah untuk mencoba memahami apa yang mendorong dinamika populasi ikan lemuru.

2. Dinamika Stok dan Pengaruh Lingkungan (ENSO)

Penelitian selama beberapa dekade telah secara meyakinkan menunjukkan bahwa fluktuasi dramatis dalam populasi ikan lemuru di Selat Bali tidak terutama disebabkan oleh tekanan penangkapan (meskipun penangkapan berlebih dapat memperburuk keadaan), melainkan sangat dipengaruhi oleh variabilitas iklim dan oseanografi yang terkait dengan fenomena El Niño-Southern Oscillation (ENSO).

Selat Bali adalah lokasi yang unik. Ia dipengaruhi oleh dua massa air yang sangat berbeda: massa air yang relatif subur dari Laut Jawa di utara, dan massa air dari Samudra Hindia di selatan. Produktivitas di Selat Bali, yang menopang populasi lemuru, sangat bergantung pada proses upwelling (pengangkatan massa air dingin yang kaya nutrisi dari lapisan dalam ke permukaan). Proses upwelling ini, pada gilirannya, sangat dipengaruhi oleh musim dan oleh kondisi iklim skala besar seperti ENSO.

Hubungan antara ENSO dan Kelimpahan Lemuru: Penelitian telah menemukan korelasi yang kuat antara siklus ENSO dan hasil tangkapan ikan lemuru, meskipun dengan jeda waktu.

- a. Fase La Niña (Kondisi “Normal” atau Dingin): Selama fase La Niña atau kondisi normal, angin muson tenggara bertiup kencang. Angin ini mendorong massa air permukaan dari Samudra Hindia di selatan Bali menjauh dari pantai, yang memicu proses *upwelling* yang kuat. Naiknya air dingin yang kaya akan nitrat dan fosfat ini “menyuburkan” lapisan permukaan, yang menyebabkan ledakan populasi fitoplankton. Kelimpahan fitoplankton ini kemudian mendukung populasi zooplankton yang melimpah, yang merupakan makanan utama bagi ikan lemuru. Hasil: Kondisi lingkungan selama La Niña sangat menguntungkan. Makanan melimpah, yang mengarah pada kondisi induk yang baik, fekunditas yang tinggi, dan yang terpenting, kelangsungan hidup larva dan rekrutmen yang tinggi. Periode La Niña yang kuat biasanya diikuti (dengan jeda waktu sekitar satu tahun) oleh peningkatan tajam dalam kelimpahan dan hasil tangkapan ikan lemuru.
- b. Fase El Niño (Kondisi Hangat): Selama fase El Niño, pola cuaca global berubah. Angin muson tenggara melemah, dan suhu permukaan laut di seluruh Indonesia menjadi lebih hangat dari biasanya. Melemahnya angin ini menyebabkan proses *upwelling* di selatan Bali menjadi sangat lemah atau bahkan berhenti sama sekali. Hasil: Tanpa pasokan nutrisi dari bawah, produktivitas primer di Selat Bali anjlok. Populasi fitoplankton dan zooplankton menurun drastis. Ikan lemuru menghadapi kondisi kelaparan. Tingkat pertumbuhan melambat, kondisi tubuh memburuk, dan yang paling kritis, kelangsungan hidup larva menjadi sangat rendah karena kekurangan makanan. Periode El Niño yang kuat hampir selalu diikuti oleh penurunan drastis atau keruntuhan hasil tangkapan ikan lemuru. Keruntuhan perikanan pada tahun 1997-1998, misalnya, bertepatan dengan salah satu peristiwa El Niño terkuat yang pernah tercatat.

Implikasi untuk Manajemen: Studi kasus ikan lemuru adalah contoh klasik dari perikanan yang dikendalikan oleh lingkungan (*environmentally-driven fishery*). Ini memiliki implikasi yang sangat penting untuk manajemen:

- a. Manajemen Konvensional Tidak Cukup: Mengelola perikanan ini hanya dengan mencoba mengontrol upaya penangkapan (misalnya, dengan membatasi jumlah kapal) tidak akan efektif dalam mencegah fluktuasi besar. Stok akan tetap runtuh selama peristiwa El Niño yang kuat, terlepas dari tingkat penangkapan.
- b. Pentingnya Peramalan: Kemampuan untuk meramalkan peristiwa El Niño beberapa bulan sebelumnya memberikan alat yang sangat berharga bagi manajer dan industri. Jika El Niño diperkirakan akan datang, manajer dapat mengeluarkan peringatan dan mungkin menerapkan tingkat penangkapan yang jauh lebih konservatif untuk melindungi sisa stok induk. Industri dapat mempersiapkan diri untuk potensi penurunan pasokan.
- c. Manajemen Adaptif: Manajemen harus bersifat adaptif dan dinamis, bukan statis. Alih-alih menetapkan kuota atau batasan upaya yang sama setiap tahun, tingkat penangkapan yang diizinkan harus disesuaikan ke atas atau ke bawah berdasarkan kondisi lingkungan saat ini dan yang diperkirakan.
- d. Diversifikasi: Bagi komunitas nelayan, ketergantungan yang berlebihan pada satu spesies yang sangat fluktuatif ini sangat berisiko. Mendorong diversifikasi mata pencaharian atau diversifikasi target penangkapan (jika memungkinkan) dapat meningkatkan ketahanan sosial-ekonomi komunitas dalam menghadapi siklus "boom-and-bust" yang tak terhindarkan.

Studi kasus ikan lemuru di Selat Bali adalah pengingat yang kuat bahwa stok ikan bukanlah entitas yang terisolasi, tetapi merupakan bagian dari sistem iklim dan ekosistem yang jauh lebih besar.

B. Studi Kasus Perikanan Demersal (Contoh: Perikanan Kakap dan Kerapu)

Beralih dari perairan pelagis ke dasar laut, kita menemukan kelompok ikan lain yang sangat penting secara ekonomi di Indonesia: ikan demersal. Kelompok ini mencakup berbagai spesies yang hidup di atau dekat dasar laut, terutama di sekitar habitat terumbu karang. Di antara yang paling berharga dan paling banyak dicari adalah spesies dari famili Lutjanidae

(kakap atau *snappers*) dan Serranidae (subfamili Epinephelinae, yaitu kerapu atau *groupers*).

Perikanan kakap dan kerapu sangat berbeda dari perikanan lemuru. Jika perikanan lemuru dicirikan oleh volume besar dan harga rendah, perikanan kakap-kerapu adalah tentang volume yang lebih rendah tetapi nilai ekonomi per unit yang sangat tinggi. Banyak dari spesies ini menjadi target utama untuk pasar ekspor ikan hidup (*live reef food fish trade* - LRFFT) ke kota-kota seperti Hong Kong dan Singapura, di mana mereka dihargai sangat mahal di restoran-restoran.

Namun, karakteristik biologi dari banyak spesies kakap dan kerapu membuat mereka sangat rentan terhadap tekanan penangkapan. Studi kasus ini menyoroti tantangan pengelolaan yang terkait dengan spesies yang tumbuh lambat, berumur panjang, dan menunjukkan perilaku reproduksi yang sangat spesifik.

1. Karakteristik Biologi dan Kerentanan

Banyak spesies kakap dan kerapu komersial berbagi serangkaian karakteristik sejarah kehidupan yang membuat mereka secara inheren rentan terhadap penangkapan berlebih. Karakteristik ini kontras dengan ikan lemuru.

- a. Pertumbuhan Lambat dan Umur Panjang (K Rendah): Berbeda dengan lemuru yang berumur pendek, banyak spesies kerapu dan kakap dapat hidup selama beberapa dekade. Kerapu macan (*Epinephelus fuscoguttatus*) dapat hidup lebih dari 40 tahun. Akibatnya, koefisien pertumbuhan von Bertalanffy (K) mereka sangat rendah. Ini berarti produktivitas dan laju perputaran (*turnover*) populasi mereka secara alami rendah. Sekali populasi mereka terkuras, pemulihannya akan memakan waktu yang sangat lama.
- b. Kematangan Seksual yang Lambat: Karena mereka tumbuh lambat, mereka juga membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk mencapai kematangan seksual. Beberapa spesies mungkin tidak matang sampai mereka berumur 5-10 tahun. Ini berarti ada jendela waktu yang panjang di mana mereka rentan terhadap alat tangkap sebelum mereka sempat bereproduksi sama sekali.

- c. Hermafroditisme Protogini: Seperti yang telah dibahas sebelumnya, banyak (jika tidak semua) spesies kerapu adalah hermafrodit protogini. Mereka memulai hidup sebagai betina dan kemudian berubah menjadi jantan pada saat mereka mencapai ukuran dan usia yang lebih besar. Perikanan sering kali secara tidak sengaja menargetkan ikan yang berukuran paling besar karena harganya yang paling mahal. Praktik ini secara tidak proporsional menghilangkan jantan dari populasi. Jika terlalu banyak jantan dihilangkan, rasio jenis kelamin dapat menjadi sangat miring, yang berpotensi menyebabkan kegagalan pembuahan dan kegagalan reproduksi untuk seluruh populasi.
- d. Tingkat Keterikatan pada Habitat yang Tinggi (*Site Fidelity*): Sebagai ikan terumbu karang, banyak kakap dan kerapu dewasa cenderung bersifat teritorial dan tidak banyak bergerak jauh dari area terumbu karang "rumah" mereka. Ini berarti bahwa jika suatu populasi lokal di satu terumbu karang habis ditangkap, pengisian kembali dari terumbu karang lain melalui migrasi dewasa mungkin sangat lambat atau tidak terjadi sama sekali. Pemulihan hanya bergantung pada rekrutmen larva dari tempat lain.

Kombinasi dari karakteristik-karakteristik ini (strategi sejarah kehidupan "K") membuat stok kakap dan kerapu sangat tidak tahan terhadap tekanan penangkapan yang tinggi. Mereka adalah contoh klasik dari spesies yang memerlukan pendekatan manajemen yang sangat hati-hati dan konservatif.

2. Tantangan Pengelolaan: Agregasi Pemijahan dan Perikanan Multi-spesies

Selain kerentanan biologis yang melekat, ada dua tantangan utama lainnya dalam mengelola perikanan kakap dan kerapu di Indonesia dan di seluruh wilayah tropis.

- a. Penangkapan pada Agregasi Pemijahan (*Spawning Aggregation Fishing*)

Tantangan terbesar dan paling merusak bagi kelestarian kerapu adalah perilaku reproduksi mereka yang membentuk agregasi pemijahan.

 - 1) Perilaku Agregasi: Meskipun mungkin bersifat soliter atau teritorial untuk sebagian besar tahun, banyak spesies kerapu dan beberapa

spesies kakap akan bermigrasi dari area yang luas ke lokasi yang sangat spesifik pada waktu yang sangat spesifik (biasanya terkait dengan fase bulan tertentu) untuk membentuk kelompok pemijahan yang sangat padat. Ratusan atau bahkan ribuan ikan mungkin berkumpul di satu lokasi kecil selama beberapa hari atau minggu untuk memijah secara massal.

- 2) Prediktabilitas dan Kerentanan: Lokasi dan waktu agregasi ini sering kali sangat dapat diprediksi. Pengetahuan ini, yang sering kali merupakan bagian dari pengetahuan ekologis tradisional (*traditional ecological knowledge* - TEK) nelayan, membuat agregasi ini menjadi target yang sangat mudah dan sangat menguntungkan. Nelayan dapat menangkap sejumlah besar ikan berkualitas tinggi (matang gonad) dengan upaya yang relatif kecil dalam waktu yang sangat singkat.
- 3) Dampak Merusak: Penangkapan ikan pada agregasi pemijahan adalah praktik yang sangat merusak. Ini tidak hanya menghilangkan sejumlah besar biomassa stok pemijah dalam sekejap, tetapi juga secara langsung mengganggu proses reproduksi itu sendiri. Dalam banyak kasus di seluruh dunia, penangkapan yang tidak diatur pada satu atau dua lokasi agregasi kunci telah menyebabkan kepunahan fungsional atau keruntuhan total dari seluruh populasi di suatu wilayah. Setelah sebuah agregasi hilang, sering kali ia tidak pernah terbentuk kembali, bahkan jika penangkapan dihentikan.

Tindakan Manajemen yang Diperlukan: Karena risiko yang ekstrem ini, perlindungan terhadap agregasi pemijahan dianggap sebagai prioritas manajemen tertinggi untuk spesies-spesies ini. Alat manajemen yang paling efektif adalah kombinasi dari:

- 1) Penutupan Musim: Melarang penangkapan spesies target selama bulan-bulan puncak pemijahan.
- 2) Penutupan Daerah: Menetapkan lokasi agregasi yang diketahui sebagai Kawasan Perlindungan Laut (MPA) *no-take zone* secara permanen.

Mengidentifikasi dan memetakan lokasi-lokasi agregasi ini melalui penelitian ilmiah dan kerja sama dengan komunitas nelayan adalah langkah pertama yang krusial untuk konservasi kerapu.

b. Sifat Multi-spesies dan Multi-alat Tangkap

Tantangan kedua yang signifikan adalah sifat perikanan demersal terumbu karang yang sangat *multi-spesies* dan multi-alat tangkap.

- 1) Multi-spesies: Tidak seperti perikanan lemuru yang menargetkan satu spesies dominan, perikanan kakap-kerapu sering kali menangkap puluhan spesies yang berbeda secara bersamaan. Satu kali operasi pancing ulur atau bubu dapat menghasilkan beberapa spesies kakap, beberapa spesies kerapu, dan berbagai spesies ikan karang lainnya.
- 2) Multi-alat Tangkap: Ikan-ikan ini ditangkap dengan berbagai jenis alat tangkap, mulai dari pancing ulur, bubu, jaring insang dasar, hingga penggunaan sianida atau bom yang merusak (meskipun ilegal). Setiap alat tangkap memiliki selektivitas dan dampak yang berbeda.
- 3) Tantangan untuk Pendugaan Stok: Sifat *multi-spesies* ini membuat pendugaan stok dengan model spesies tunggal konvensional menjadi sangat sulit.
 - Pengumpulan Data: Mengumpulkan data hasil tangkapan yang dipilah berdasarkan spesies untuk puluhan spesies yang berbeda adalah tugas yang sangat besar. Sering kali, ikan-ikan ini hanya dicatat dalam kategori umum seperti "kakap merah" atau "kerapu", yang mencampuradukkan beberapa spesies dengan biologi yang berbeda.
 - Interaksi Teknis: Alat tangkap yang sama menangkap banyak spesies, sehingga sulit untuk mengelola satu spesies tanpa mempengaruhi yang lain. Misalnya, jika stok kerapu macan dinilai telah habis dan manajer ingin menghentikan penangkapannya, ini hampir tidak mungkin dilakukan tanpa juga menghentikan penangkapan kakap yang ditangkap dengan alat tangkap yang sama.

Pendekatan Manajemen: Karena kesulitan ini, manajemen perikanan demersal multi-spesies sering kali memerlukan pendekatan yang berbeda dari perikanan spesies tunggal.

- 1) Manajemen Berbasis Kelompok (*Assemblage-based Management*): Alih-alih mencoba menilai setiap spesies secara terpisah, spesies dengan

karakteristik biologi yang serupa (misalnya, “kerapu yang tumbuh lambat”, “kakap yang tumbuh sedang”) dapat dikelompokkan bersama untuk tujuan penilaian dan pengelolaan.

- 2) Fokus pada Peraturan Teknis dan Spasial: Karena sulit untuk mengontrol hasil tangkapan per spesies, penekanan yang lebih besar sering kali ditempatkan pada peraturan teknis dan spasial yang dapat memberikan manfaat bagi seluruh komunitas ikan. Ini termasuk:
 - Larangan Alat Tangkap yang Merusak: Melarang secara ketat penggunaan bom dan sianida.
 - Pengaturan Alat Tangkap: Menerapkan batasan pada alat tangkap (misalnya, ukuran kail atau spesifikasi bubu) untuk mengurangi penangkapan yuwana.
 - Jaringan Kawasan Perlindungan Laut (MPA Network): Ini mungkin adalah alat yang paling ampuh. Dengan melindungi area-area terumbu karang yang representatif dari semua penangkapan, kita dapat melindungi seluruh komunitas ikan demersal, memungkinkan mereka untuk tumbuh, bereproduksi, dan menyediakan manfaat limpahan (*spillover*) dan ekspor larva ke area penangkapan di sekitarnya.

Studi kasus kakap dan kerapu menunjukkan bahwa untuk spesies yang rentan secara biologis dan ditangkap dalam perikanan yang kompleks, pendekatan manajemen harus sangat berhati-hati, berfokus pada perlindungan proses-proses kunci dalam siklus hidup (seperti pemijahan), dan sering kali mengandalkan manajemen berbasis spasial sebagai alat utamanya.

C. Tantangan dan Masa Depan Biologi Perikanan di Indonesia

Dua studi kasus sebelumnya—satu didorong oleh lingkungan dan yang lainnya didorong oleh biologi kerentanan—memberikan gambaran sekilas tentang kompleksitas pengelolaan perikanan di Indonesia. Ke depan, para ilmuwan dan manajer perikanan di Indonesia menghadapi serangkaian tantangan yang signifikan, tetapi juga peluang untuk mengembangkan pendekatan inovatif yang disesuaikan dengan konteks tropis yang unik.

Bagian ini akan merangkum tiga tantangan utama dan menyoroti arah masa depan untuk ilmu biologi perikanan di negara ini.

1. Perikanan yang Miskin Data (*Data-Poor Fisheries*)

Salah satu tantangan paling mendasar dan paling luas yang dihadapi oleh manajemen perikanan di Indonesia adalah masalah kemiskinan data (*data-poor*). Model-model pendugaan stok konvensional yang canggih, seperti model statistik tangkapan per umur (SCA), memerlukan data rangkaian waktu (*time series*) yang panjang dan konsisten untuk hasil tangkapan, upaya, dan komposisi umur. Mengumpulkan data semacam ini untuk ratusan spesies yang ditangkap oleh ribuan kapal yang tersebar di ribuan pelabuhan pendaratan di seluruh nusantara adalah tugas yang sangat besar dan mahal.

Akibatnya, sebagian besar perikanan di Indonesia dapat diklasifikasikan sebagai "miskin data". Ini bukan berarti tidak ada data sama sekali, tetapi data yang tersedia sering kali tidak cukup untuk mendukung penerapan model-model penilaian stok yang paling intensif data.

Karakteristik Perikanan Miskin Data di Indonesia:

- a. Data Hasil Tangkapan yang Tidak Pasti: Total hasil tangkapan sering kali tidak tercatat dengan baik, terutama dari sektor perikanan skala kecil yang sangat besar.
- b. Data Upaya yang Tidak Terstandarisasi: Upaya penangkapan sulit diukur secara konsisten karena keragaman alat tangkap dan perubahan efisiensi yang tidak terdokumentasi.
- c. Data Biologis yang Terbatas: Pengambilan sampel biologis untuk studi umur, pertumbuhan, dan reproduksi sering kali bersifat sporadis, tidak mencakup semua wilayah, atau hanya berfokus pada beberapa spesies utama. Penentuan umur untuk banyak spesies tropis itu sendiri merupakan tantangan ilmiah.

Arah Masa Depan: Pendekatan untuk Situasi Miskin Data Menghadapi kenyataan ini, salah satu bidang penelitian yang paling aktif dan paling relevan untuk Indonesia adalah pengembangan dan penerapan metode pendugaan stok untuk situasi miskin data (*data-poor stock assessment*

methods). Pendekatan ini tidak mencoba untuk meniru model yang kompleks, tetapi menggunakan data yang tersedia (bahkan jika terbatas) secara cerdas untuk memberikan indikasi kasar tentang status stok dan risiko.

- a. Metode Berbasis Panjang: Banyak dari metode ini sangat bergantung pada data distribusi frekuensi panjang, yang relatif lebih mudah dan lebih murah untuk dikumpulkan daripada data umur. Metode seperti *Length-Based Spawning Potential Ratio* (LBSPR) dapat menggunakan data panjang untuk memperkirakan seberapa besar potensi reproduktif stok telah berkurang akibat penangkapan.
- b. Analisis Produktivitas dan Kerentanan (*Productivity-Susceptibility Analysis* - PSA): Ini adalah pendekatan berbasis risiko kualitatif yang tidak mencoba untuk mengestimasi biomassa. Sebaliknya, ia menilai risiko relatif dari berbagai spesies terhadap penangkapan berlebih dengan memberi skor pada atribut produktivitas mereka (berdasarkan sejarah kehidupan, seperti K dan tmax) dan atribut kerentanan mereka terhadap perikanan (berdasarkan seberapa sering mereka tertangkap). Spesies dengan produktivitas rendah dan kerentanan tinggi dianggap paling berisiko dan menjadi prioritas untuk manajemen yang hati-hati.
- c. Pemanfaatan Pengetahuan Lokal (*Local Ecological Knowledge* - LEK): Mengintegrasikan pengetahuan dari nelayan berpengalaman tentang tren historis dalam hasil tangkapan, ukuran ikan, dan lokasi pemijahan dapat memberikan informasi kualitatif yang sangat berharga untuk melengkapi data ilmiah yang terbatas.

Masa depan biologi perikanan di Indonesia akan sangat bergantung pada kemampuan untuk berinovasi dan menerapkan perangkat analisis yang sesuai dengan realitas data yang ada, sambil secara bertahap terus membangun sistem pemantauan jangka panjang yang lebih baik.

2. Dampak Perubahan Iklim terhadap Perikanan Indonesia

Tantangan besar kedua yang bersifat global tetapi memiliki dampak lokal yang sangat signifikan adalah perubahan iklim. Perairan Indonesia, yang berada di jantung "benua maritim" tropis, sangat rentan terhadap dampak pemanasan global. Perubahan iklim bukan lagi ancaman di masa

depan; dampaknya sudah mulai dirasakan dan diperkirakan akan semakin intensif. Ilmu biologi perikanan di masa depan harus secara eksplisit memasukkan pertimbangan perubahan iklim ke dalam analisis dan nasihat pengelolannya.

Dampak utama dari perubahan iklim terhadap ekosistem laut dan perikanan Indonesia meliputi:

a. Pemanasan Suhu Laut

- 1) Pergeseran Distribusi (*Poleward Shift*): Seiring dengan memanasnya lautan, banyak spesies ikan akan cenderung bergeser distribusinya ke arah lintang yang lebih tinggi (ke selatan, menuju perairan yang lebih dingin di Samudra Hindia) atau ke perairan yang lebih dalam untuk tetap berada dalam rentang suhu optimal mereka. Pergeseran ini dapat memindahkan stok ikan keluar dari area penangkapan tradisional dan bahkan melintasi batas-batas yurisdiksi (WPP-RI dan batas negara), yang menciptakan tantangan baru untuk alokasi dan pengelolaan.
- 2) Perubahan Fisiologi: Suhu yang lebih hangat akan meningkatkan laju metabolisme ikan, yang dapat mengubah laju pertumbuhan dan kebutuhan makanan mereka.
- 3) Pemutihan Karang (*Coral Bleaching*): Peningkatan suhu laut adalah penyebab utama dari peristiwa pemutihan karang massal. Kematian terumbu karang secara luas akan menghancurkan habitat kritis bagi ribuan spesies ikan demersal, yang secara langsung mengancam kelestarian perikanan terumbu karang.

b. Pengasaman Laut (*Ocean Acidification*)

Lautan menyerap sekitar seperempat dari karbon dioksida (CO₂) yang dilepaskan ke atmosfer oleh aktivitas manusia. Hal ini menyebabkan penurunan pH air laut, sebuah proses yang disebut pengasaman laut.

- Dampak pada Organisme Berkalsifikasi: Pengasaman laut membuat lebih sulit bagi organisme laut untuk membangun cangkang atau kerangka dari kalsium karbonat. Ini sangat berbahaya bagi terumbu karang, moluska (kerang-kerangan), dan beberapa jenis plankton (seperti pteropoda) yang menjadi dasar dari jaring makanan laut. Gangguan

pada dasar jaring makanan ini pada akhirnya akan berdampak pada populasi ikan.

c. Perubahan Pola Cuaca dan Oseanografi

- 1) Perubahan Intensitas ENSO: Perubahan iklim diperkirakan akan meningkatkan frekuensi dan intensitas dari peristiwa El Niño yang ekstrem. Seperti yang ditunjukkan oleh studi kasus ikan lemuru, hal ini dapat menyebabkan fluktuasi yang lebih liar dalam produktivitas dan hasil tangkapan perikanan pelagis.
- 2) Perubahan Arus Laut: Perubahan pola angin dan suhu dapat mengubah sistem arus laut utama, yang dapat mengganggu pola penyebaran larva dan konektivitas antar populasi.
- 3) Peningkatan Badai Tropis: Peningkatan intensitas badai dapat secara langsung merusak habitat pesisir seperti hutan bakau dan terumbu karang, serta mengancam keselamatan nelayan.

Arah Masa Depan: Manajemen Perikanan yang Adaptif terhadap Iklim (*Climate-Adaptive Fisheries Management*) Menghadapi tantangan ini, biologi perikanan harus berevolusi.

- 1) Pemantauan yang Ditingkatkan: Memantau perubahan suhu, pH, dan kondisi oseanografi lainnya menjadi sama pentingnya dengan memantau populasi ikan itu sendiri.
- 2) Penilaian Kerentanan: Melakukan penilaian untuk mengidentifikasi spesies, perikanan, dan komunitas pesisir mana yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim.
- 3) Memasukkan Iklim ke dalam Model: Model pendugaan stok di masa depan perlu secara eksplisit memasukkan variabel lingkungan dan iklim untuk membuat proyeksi yang lebih realistis.
- 4) Membangun Ketahanan (*Resilience*): Fokus manajemen akan semakin bergeser dari mencoba mempertahankan kondisi historis menjadi membangun ketahanan ekologis dan sosial. Alat-alat seperti jaringan MPA yang efektif dan pengurangan stresor lokal lainnya (seperti polusi dan penangkapan berlebih) adalah cara terbaik untuk meningkatkan kemampuan ekosistem untuk menahan dan pulih dari guncangan iklim.

3. Menuju Pengelolaan Berbasis Sains yang Kuat

Tantangan terakhir, yang mendasari semua tantangan lainnya, adalah kebutuhan untuk terus memperkuat fondasi pengelolaan perikanan berbasis sains (*science-based fisheries management*) di Indonesia. Meskipun kemajuan signifikan telah dicapai, masih ada kesenjangan antara dunia ilmu pengetahuan, pembuatan kebijakan, dan implementasi di lapangan.

Masa depan biologi perikanan yang efektif di Indonesia akan bergantung pada penguatan beberapa pilar utama:

- a. Peningkatan Kapasitas Kelembagaan dan Sumber Daya Manusia
 - 1) Investasi dalam Riset: Diperlukan investasi berkelanjutan dalam lembaga-lembaga riset perikanan (seperti yang ada di bawah KKP dan BRIN) dan universitas untuk dapat melakukan penelitian jangka panjang yang berkualitas tinggi.
 - 2) Pengembangan Sumber Daya Manusia: Mendidik dan melatih generasi baru ilmuwan perikanan, ahli pendugaan stok, dan teknisi yang memiliki keterampilan kuantitatif dan analitis yang kuat adalah hal yang sangat penting.
 - 3) Kolaborasi: Mendorong kolaborasi yang lebih erat antara ilmuwan, manajer, industri perikanan, dan komunitas nelayan.
- b. Penguatan Sistem Pemantauan dan Data
 - 1) Modernisasi Pengumpulan Data: Memanfaatkan teknologi baru untuk meningkatkan efisiensi dan cakupan pengumpulan data. Ini bisa mencakup penggunaan sistem pelaporan elektronik (*e-logbooks*), kamera pemantauan elektronik di atas kapal, dan data citra satelit.
 - 2) Standarisasi dan Integrasi Data: Mengembangkan protokol standar nasional untuk pengumpulan data dan membangun basis data terpusat yang dapat diakses yang mengintegrasikan informasi dari berbagai sumber.
 - 3) Fokus pada Perikanan Skala Kecil: Memberikan perhatian khusus untuk mengembangkan metode yang hemat biaya untuk memantau sektor perikanan skala kecil yang sangat besar dan penting.

c. Memperkuat Hubungan Sains-Kebijakan (*Science-Policy Interface*)

- 1) Komunikasi Ilmiah yang Efektif: Ilmuwan perlu menjadi lebih baik dalam mengkomunikasikan hasil penelitian mereka yang sering kali kompleks ke dalam bahasa yang jelas, ringkas, dan relevan bagi para pembuat kebijakan dan masyarakat umum. Nasihat ilmiah harus secara eksplisit menyatakan ketidakpastian dan risiko.
- 2) Proses Pengambilan Keputusan yang Transparan: Proses di mana nasihat ilmiah dipertimbangkan dan keputusan pengelolaan dibuat harus transparan dan dapat dipertanggungjawabkan. Peran dari badan-badan penasihat ilmiah seperti Komnas Kajiskan sangat penting dalam menjembatani kesenjangan antara sains dan kebijakan.

Kesimpulan Akhir Biologi perikanan adalah disiplin ilmu yang dinamis dan sangat diperlukan. Di Indonesia, dengan kekayaan sumber daya lautnya yang luar biasa dan tantangan pengelolaannya yang kompleks, peran ilmu ini menjadi lebih penting daripada sebelumnya. Dengan merangkul pendekatan baru untuk situasi miskin data, secara proaktif mengatasi dampak perubahan iklim, dan terus membangun kapasitas untuk sains yang kuat dan relevan dengan kebijakan, biologi perikanan dapat dan harus memainkan peran sentral dalam memandu Indonesia menuju masa depan di mana lautan yang sehat dan perikanan yang produktif dapat dinikmati oleh generasi-generasi yang akan datang. Perjalanan ini panjang dan menantang, tetapi dengan komitmen pada ilmu pengetahuan dan pengelolaan yang bijaksana, tujuan tersebut dapat dicapai.

Glosarium

- Agregasi Pemijahan**
(*Spawning Aggregation*) : Pertemuan ikan dalam kepadatan tinggi di lokasi dan waktu tertentu untuk tujuan reproduksi.
- Alometri** (*Allometry*) : Pertumbuhan bagian-bagian tubuh yang berbeda pada laju yang berbeda, yang menyebabkan perubahan bentuk tubuh seiring dengan bertambahnya ukuran.
- Anadromus**
(*Anadromous*) : Pola migrasi di mana ikan lahir di air tawar, tumbuh di laut, dan kembali ke air tawar untuk memijah. Contoh: Salmon.
- Analisis Kohort Virtual**
(*Virtual Population Analysis - VPA*) : Metode pendugaan stok berstruktur umur yang merekonstruksi kelimpahan populasi di masa lalu dengan bekerja mundur dari data hasil tangkapan per umur.
- Annulus (Jamak: Annuli)** : Tanda pertumbuhan tahunan (mirip lingkaran tahunan pohon) yang terbentuk pada struktur keras ikan seperti otolith atau sisik.
- Biomassa Stok Pemijah**
(*Spawning Stock Biomass - SSB*) : Total berat dari semua individu yang matang secara seksual dalam suatu populasi, yang merupakan ukuran dari potensi reproduktif stok.
- Bycatch (Hasil Tangkapan Sampingan)** : Spesies non-target yang tertangkap secara tidak sengaja dalam suatu operasi perikanan.

- Diadromus (*Diadromous*)** : Istilah umum untuk ikan yang bermigrasi antara air tawar dan air asin.
- Faktor Kondisi (*Condition Factor*)** : Indeks kuantitatif yang mengukur "kegemukan" atau kesehatan relatif seekor ikan.
- Fekunditas (*Fecundity*)** : Jumlah telur yang dihasilkan oleh seekor ikan betina.
- Gametogenesis** : Proses pembentukan sel kelamin (gamet). Oogenesis pada betina, spermatogenesis pada jantan.
- Hasil per Rekrut (*Yield-per-Recruit - YPR*)** : Analisis yang menghitung total hasil tangkapan (berat) yang dapat diperoleh dari suatu kohort selama masa hidupnya di bawah skenario pengelolaan yang berbeda.
- Hasil Tangkapan Maksimum yang Lestari (*Maximum Sustainable Yield - MSY*)** : Hasil tangkapan rata-rata teoretis tertinggi yang dapat diambil dari suatu stok secara berkelanjutan.
- Hermafrodit Protogini (*Protogynous Hermaphrodite*)** : Organisme yang memulai hidup sebagai betina dan kemudian berganti kelamin menjadi jantan.
- Ikhtioplankton (*Ichthyoplankton*)** : Telur dan larva ikan yang bersifat planktonik (melayang di kolom air).
- Index of Relative Importance (IRI)*** : Indeks gabungan yang banyak digunakan untuk mengukur pentingnya relatif dari berbagai item makanan dalam diet seekor ikan.
- Kapasitas Tampung (*Carrying Capacity - K*)** : Ukuran populasi maksimum yang dapat didukung secara berkelanjutan oleh sumber daya yang tersedia di suatu lingkungan.
- Katadromus (*Catadromous*)** : Pola migrasi di mana ikan lahir di laut, tumbuh di air tawar, dan kembali ke laut untuk memijah. Contoh: Sidat.

- Kohort (*Cohort*)** : Sekelompok individu yang lahir pada periode waktu yang sama (biasanya dalam satu tahun), juga dikenal sebagai angkatan atau *year-class*.
- Mortalitas Alami (*Natural Mortality - M*)** : Laju kematian akibat semua penyebab selain penangkapan (misalnya, predasi, penyakit).
- Mortalitas Penangkapan (*Fishing Mortality - F*)** : Laju kematian yang disebabkan langsung oleh aktivitas perikanan.
- Mortalitas Total (*Total Mortality - Z*)** : Laju kematian total dari semua penyebab. $Z = F + M$.
- Otolit (*Otolith*)** : "Batu telinga" dari kalsium karbonat di telinga dalam ikan, yang umum digunakan untuk penentuan umur.
- Pendekatan Ekosistem untuk Pengelolaan Perikanan (*Ecosystem Approach to Fisheries Management - EAFM*)** : Kerangka kerja pengelolaan holistik yang mempertimbangkan dampak perikanan terhadap seluruh ekosistem dan menyeimbangkan tujuan ekologis, sosial, dan ekonomi.
- Pendugaan Stok (*Stock Assessment*)** : Proses kuantitatif untuk mengevaluasi status suatu sumber daya perikanan dan memberikan nasihat ilmiah untuk pengelolaannya.
- Rekrutmen (*Recruitment*)** : Proses di mana individu baru berhasil bertahan hidup melalui tahap awal dan bergabung dengan populasi yang dapat diamati atau dieksploitasi.
- Stok (*Stock*)** : Sekelompok individu dari suatu spesies yang dapat diperlakukan sebagai satu unit untuk tujuan penilaian dan pengelolaan.

**Upaya Penangkapan
(Fishing Effort)**

: Ukuran dari total intensitas aktivitas penangkapan.

**Vitelogenesis
(Vitellogenesis)**

: Proses akumulasi kuning telur (yolk) di dalam oosit yang sedang berkembang.

**Wilayah Pengelolaan
Perikanan (WPP)**

: Unit geografis perairan yurisdiksi Indonesia yang digunakan untuk tujuan pengelolaan perikanan.

DUMMMY

Daftar Pustaka

- Alonzo, S. H. (2010). The effect of size-selective fishing on the evolution of reproductive strategies and sex change in harvested populations. *Journal of Fish Biology*, 77(8), 1773-1794.
- Bakun, A. (1996). *Patterns in the ocean: Ocean processes and marine population dynamics*. California Sea Grant College System.
- Beamish, R. J., & McFarlane, G. A. (1983). The forgotten requirement for age validation in fisheries biology. *Transactions of the American Fisheries Society*, 112(6), 735-743.
- Bertalanffy, L. von. (1938). A quantitative theory of organic growth (Inquiries on growth laws. II). *Human Biology*, 10(2), 181-213.
- Beverton, R. J. H., & Holt, S. J. (1957). *On the dynamics of exploited fish populations*. Fishery Investigations Series II, Volume XIX. Her Majesty's Stationery Office.
- Beverton, R. J. H., & Holt, S. J. (1959). A review of the lifespans and mortality rates of fish in nature, and their relation to growth and other physiological characteristics. In G. E. W. Wolstenholme & M. O'Connor (Eds.), *Ciba Foundation Colloquia on Ageing, Vol. 5, The Lifespan of Animals* (pp. 142-180). J. & A. Churchill.
- Cadrin, S. X., Friedland, K. D., & Waldman, J. R. (Eds.). (2005). *Stock identification methods: Applications in fishery science*. Elsevier Academic Press.
- Campana, S. E. (2001). Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Journal of Fish Biology*, 59(2), 197-242.
- Cushing, D. H. (1990). Plankton production and year-class strength in fish populations: An update of the match/mismatch hypothesis. *Advances in Marine Biology*, 26, 249-293.

- Fox, W. W. (1970). An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations. *Transactions of the American Fisheries Society*, 99(1), 80–88.
- Froese, R. (2006). Cube law, condition factor and weight–length relationships: history, meta-analysis and recommendations. *Journal of Applied Ichthyology*, 22(4), 241–253.
- Gulland, J. A. (1983). *Fish stock assessment: A manual of basic methods*. John Wiley & Sons.
- Hilborn, R., & Walters, C. J. (1992). *Quantitative fisheries stock assessment: Choice, dynamics and uncertainty*. Chapman and Hall.
- Hjort, J. (1914). Fluctuations in the great fisheries of northern Europe viewed in the light of biological research. *Rapports et Procès-Verbaux des Réunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 20, 1–228.
- Hoening, J. M. (1983). Empirical use of longevity data to estimate mortality rates. *Fishery Bulletin*, 82(1), 898–903.
- Hyslop, E. J. (1980). Stomach contents analysis—a review of methods and their application. *Journal of Fish Biology*, 17(4), 411–429.
- King, M. (2007). *Fisheries biology, assessment and management* (2nd ed.). Blackwell Publishing.
- Le Cren, E. D. (1951). The length-weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *The Journal of Animal Ecology*, 20(2), 201–219.
- Myers, G. S. (1949). Usage of anadromous, catadromous and allied terms for migratory fishes. *Copeia*, 1949(2), 89–97.
- Natarajan, A. V., & Jhingran, A. G. (1961). Index of preponderance- a method of grading the food elements in the stomach analysis of fishes. *Indian Journal of Fisheries*, 8(1), 54–59.
- Pauly, D. (1980). On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks. *Journal du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, 39(2), 175–192.
- Pauly, D., Christensen, V., Dalsgaard, J., Froese, R., & Torres, F. (1998). Fishing down marine food webs. *Science*, 279(5352), 860–863.

- Pinkas, L., Oliphant, M. S., & Iverson, I. L. K. (1971). Food habits of albacore, bluefin tuna, and bonito in California waters. *California Department of Fish and Game, Fish Bulletin*, 152, 1–105.
- Ricker, W. E. (1954). Stock and recruitment. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 11(5), 559–623.
- Ricker, W. E. (1975). Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, (191), 1–382.
- Rikhter, V. A., & Efanov, V. N. (1976). On one of the approaches to estimation of natural mortality of fish populations. *ICNAF Research Document*, 76/VI/8, 1-12.
- Schaefer, M. B. (1954). Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bulletin of the Inter-American Tropical Tuna Commission*, 1(2), 27–56.

DUMMNY

Biodata Penulis



BURHANIS, lahir di Desa Gunong Kleng Kec. Meureubo Kab. Aceh Barat Prov. Aceh pada tanggal 20 Agustus 1985 sebagai anak ke tujuh dari delapan bersaudara dari pasangan Ayah (Alm) Nurman dan Mamak Raidah.

Penulis menyelesaikan pendidikan Madrasah Aliyah Negeri (MAN) 1 Meulaboh pada tahun 2003. Pendidikan Sarjana (S-1) di bidang Ilmu Perikanan di Universitas Teuku Umar diselesaikan pada tahun 2012, kemudian melanjutkan studi magister (S-2) di bidang Ilmu Kelautan di Institut Pertanian Bogor (IPB) tahun 2015 dan lulus pada tahun 2018 melalui dukungan Beasiswa LPDP (Lembaga Pengelola Dana Pendidikan). Penulis menikah dan berkeluarga dengan Eri Yanti pada tahun 2011 dan dikaruniai anak pertama (Aathifah Khaireen) tahun 2012, anak kedua (Aulia Izzatunnisa) tahun 2015 serta tahun 2018 dikaruniai anak yang ketiga (Raysyah Salwa).

Penulis Sejak tahun 2019, aktif sebagai dosen dan peneliti di Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Teuku Umar. Ia terlibat aktif dalam kegiatan Tri Dharma Perguruan Tinggi, khususnya pada bidang riset dan publikasi ilmiah di bidang perikanan dan kelautan. Hasil penelitiannya telah dipresentasikan dalam forum ilmiah nasional dan internasional serta diterbitkan dalam jurnal terakreditasi dan jurnal bereputasi internasional. Beberapa karya intelektualnya juga telah memperoleh pengakuan dalam bentuk Hak Kekayaan Intelektual (HKI).

Fokus keilmuan pada pengelolaan sumber daya ikan yang berkelanjutan, melalui pendekatan berbasis data serta prinsip efisiensi-ekologi berkelanjutan. Bagi penulis, keberlanjutan sumber daya perikanan merupakan mandat ilmiah sekaligus tanggung jawab moral, yang menuntut kontribusi nyata dari kalangan akademisi dalam menjaga integritas ekosistem akuatik dan ketahanan pangan nasional.

BIOLOGI PERIKANAN

Buku "*Biologi Perikanan*" ini disusun sebagai rujukan ilmiah dan praktis dalam memahami kompleksitas kehidupan ikan dan aplikasinya dalam pengelolaan sumber daya perikanan yang berkelanjutan. Disusun oleh para akademisi dan praktisi perikanan, buku ini mengupas tuntas prinsip-prinsip biologi populasi ikan, dengan pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan iktiologi, ekologi, oseanografi, hingga manajemen perikanan moderen.

Dengan 12 bab utama, buku ini membahas aspek-aspek fundamental mulai dari morfologi dan fisiologi ikan, sistem reproduksi, pertumbuhan, kebiasaan makan, hingga dinamika populasi dan rekrutmen. Pembaca juga akan dibimbing dalam memahami metode identifikasi stok, teknik penilaian mortalitas, serta pendekatan kuantitatif dalam pendugaan stok dan manajemen perikanan berbasis ekosistem (EAFM).

Dilengkapi studi kasus khas perairan Indonesia, buku ini tidak hanya menyajikan teori dan metode, tetapi juga contoh aplikatif yang relevan dengan konteks lokal hingga tantangan data-poor fisheries akibat perubahan iklim.

Buku ini direkomendasikan sebagai referensi wajib bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan para pengambil kebijakan di bidang perikanan dan kelautan. Dengan pendekatan yang sistematis, analitis, dan berbasis bukti ilmiah, buku ini menjadi jembatan penting antara sains dan praktik pengelolaan perikanan yang berdaya saing dan berkelanjutan.

