*Buku Referensi*

# PERIKANAN BUDIDAYA

## PEMULIAAN IKAN BERBASIS BIOTEKNOLOGI



Dr. Ervina Indrayani, S.Si., M.Si.
Kristina Haryati, M.Si.
Dr. Agus Putra AS.
Dr. Dwi Indah Widya Yanti, M.Si.

BUKU REFERENSI

# PERIKANAN BUDIDAYA
# Pemuliaan Ikan Berbasis Bioteknologi

**Dr. Ervina Indrayani, S.Si., M.Si.**
**Kristina Haryati, M.Si.**
**Dr. Agus Putra AS.**
**Dr. Dwi Indah Widya Yanti, M.Si.**

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

# PERIKANAN BUDIDAYA

## Pemuliaan Ikan Berbasis Bioteknologi

**JILID 2**

Ditulis oleh:
Dr. Ervina Indrayani, S.Si., M.Si.
Kristina Haryati, M.Si.
Dr. Agus Putra AS.
Dr. Dwi Indah Widya Yanti, M.Si.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku
tanpa izin tertulis dari penerbit.

ISBN: 978-634-316-076-2
V + 262 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, September 2026

**Desain Cover dan Tata Letak:**
Ajrina Putri Hawari, S.AB.

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
**PT Media Penerbit Indonesia**
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: https://mediapenerbitindonesia.com
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



# KATA PENGANTAR

Buku referensi ini merupakan jilid kedua dari seri Perikanan Budidaya yang secara khusus membahas pemuliaan ikan berbasis bioteknologi modern. Penyusunan buku ini dilatarbelakangi oleh pesatnya perkembangan ilmu genetika, biologi molekuler, dan teknologi informasi yang telah merevolusi cara kita memahami dan memanipulasi sifat-sifat genetik ikan budidaya.

Industri akuakultur global kini menghadapi tantangan yang semakin kompleks, mulai dari kebutuhan pemenuhan protein hewani yang terus meningkat, ancaman penyakit ikan yang semakin beragam, tekanan perubahan iklim, hingga tuntutan keberlanjutan lingkungan. Dalam konteks inilah bioteknologi pemuliaan ikan hadir sebagai solusi yang menjanjikan sekaligus menantang.

Buku ini dirancang dengan pendekatan integratif yang menghubungkan teori genetika klasik dengan teknologi terkini seperti genomic selection, CRISPR-Cas9, kecerdasan buatan, dan big data. Setiap bab disusun secara sistematis mulai dari konsep dasar hingga aplikasi mutakhir, dilengkapi dengan diagram, tabel, dan studi kasus yang relevan.

Kami berharap buku ini dapat menjadi rujukan yang komprehensif bagi mahasiswa pascasarjana, peneliti, dan praktisi industri perikanan budidaya di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara. Kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan untuk penyempurnaan edisi berikutnya.

Salam Hangat

Tim Penulis

# DAFTAR ISI

**KATA PENGANTAR** ..... **i**
**DAFTAR ISI** ..... **ii**
**BAB I PARADIGMA MODERN PEMULIAAN IKAN DALAM AKUAKULTUR BERBASIS BIOTEKNOLOGI** ..... **1**
A. Evolusi Pemuliaan Ikan dalam Akuakultur Berbasis Bioteknologi ..... 1
B. Peran Bioteknologi dalam Revolusi Akuakultur ..... 5
C. Tantangan Global Industri Perikanan Budidaya ..... 9
D. Konsep *Sustainable Genetic Inprovement* ..... 13
E. Integrasi Genetika, Lingkungan, dan Teknologi ..... 15

**BAB II DASAR-DASAR GENETIKA DAN PEWARISAN SIFAT PADA IKAN** ..... **19**
A. Struktur DNA dan Genom Ikan ..... 19
B. Hukum Pewarisan Mendel pada Organisme Akuatik ..... 22
C. Variabilitas Genetik Populasi Ikan ..... 27
D. Haritabilitas dan Seleksi Genetik ..... 33
E. Market Genetik dalam Budidaya ..... 38

**BAB III TEKNOLOGI SELEKSI GENETIK DALAM PEMULIAAN IKAN** ..... **47**
A. Seleksi Massa dan Seleksi Keluarga ..... 47
B. *Marker Assisted Selection* (MAS) ..... 51
C. *Genomic Selection* dalam Akuakultur ..... 56
D. Seleksi Berbasis Karakter Unggul ..... 60
E. Evaluasi Efektifitas Program Seleksi ..... 64

**BAB IV MANIPULASI REPRODUKSI DAN TEKNOLOGI PEMBENIHAN MODERN ..... 69**
A. Rekayasa Hormonal pada Reproduksi Ikan..... 69
B. *Induced Spawning* dan Teknologi Pemijahan ..... 73
C. *Cryopreservation* Sperma dan Embrio ..... 81
D. Teknologi *Sex Reversal* ..... 88
E. Sinkronisasi Kematangan Gonad..... 91

**BAB V HIBRIDISASI DAN PEMBENTUKAN STRAIN UNGGUL ..... 95**
A. Konsep Hibridisasi dalam Akuakultur ..... 95
*B.* Strategi *Crossbreeding* dan *Inbreeding* ..... 103
C. *Hybrid Vigor* (Heterosis) ..... 109
D. Pembentukan Strain Tahan Penyakit..... 112
E. Risiko Genetik pada Hibridasi..... 117

**BAB VI BIOTEKNOLOGI MOLEKULER DALAM PEMULIAAN IKAN ..... 121**
A. *Polymerase Chain Reaction* dan Analisis DNA pada Ikan ..... 121
B. Sekuensing Genetik Akuakultur..... 126
C. DNA *Barcoding* untuk Identifikasi Spesies ..... 130
D. *Transcriptomics* dan *Proteomics* ..... 134
E. Bioinformatika dalam Pemuliaan Ikan ..... 138

**BAB VII REKAYASA GENETIKA DAN EDITING GEN PADA IKAN..... 145**
A. Konsep Rekayasa Genetika Akuatik ..... 145
B. Transgenik pada Ikan Budidaya ..... 147
C. Teknologi CRISPR-Cas9..... 150
D. Potensi dan Resiko *Gene Editing* ..... 154
E. Regulasi Global Rekayasa Genetik ..... 156

**BAB VIII BIOTEKNOLOGI UNTUK KETAHANAN PENYAKIT DAN ADAPTASI LINGKUNGAN ..... 163**
A. Gen Resistensi Penyakit pada Ikan..... 163
B. Imunogenetika Akuakultur ..... 167

C. Adaptasi Terhadap Perubahan Ikan ..... 169
D. Pemuliaan untuk Toleransi Lingkungan Ekstrem..... 172
E. Integrasi Bioteknologi dan *Biosecurity* ..... 174

**BAB IX NUTRIGENOMIK DAN EFISIENSI PAKAN DALAM AKUAKULTUR ..... 177**
A. Konsep Nutrigenomik pada Ikan ..... 177
B. Interaksi Gen dan Nutrisi..... 181
C. Efisiensi Konversi Pakan..... 184
D. Bioteknologi Pakan Fungsional..... 188
E. Pemuliaan untuk Efisiensi Metabolik..... 191

**BAB X *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* DAN *BIG DATA* DALAM PEMULIAAN IKAN ..... 195**
A. *Digital Aquaculture* dan *Smart Breeding* ..... 195
B. AI untuk Prediksi Karakter Genetik ..... 198
C. *Big Data* Akuakultur ..... 203
D. *Machine Learning* dalam Seleksi Ikan ..... 206
E. Masa Depan Akuakultur Presisi ..... 208

**BAB XI ETIKA, REGULASI, DAN KEBERLANJUTAN PEMULIAAN BERBASIS BIOTEKNOLOGI..... 211**
A. Bioetika Rekayasa Genetik Akuatik..... 211
B. Keamanan Hayati dan Lingkungan ..... 213
C. Regukasi Nasional dan Internasional ..... 216
D. Hak Kekayaan Intelektual Strain Ikan..... 220
E. *Sustainable Aquaculture Governance* ..... 222

**BAB XII MASA DEPAN PEMULIAAN IKAN BERBASIS BIOTEKNOLOGI ..... 225**
A. Akuakultur Masa Depan dan Ketahanan Pangan ..... 225
B. Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi..... 227
C. *Blue Biotechnology Economy*..... 230
D. Tantangan SDGs dalam Akuakultur..... 232
E. *Roadmap* Pemuliaan Ikan Generasi Baru..... 238

**DAFTAR PUSTAKA ..... 243**
**GLOSARIUM ..... 255**
**INDEKS ..... 259**
**BIOGRAFI PENULIS..... 261**



# BAB I
# PARADIGMA MODERN PEMULIAAN IKAN DALAM AKUAKULTUR BERBASIS BIOTEKNOLOGI

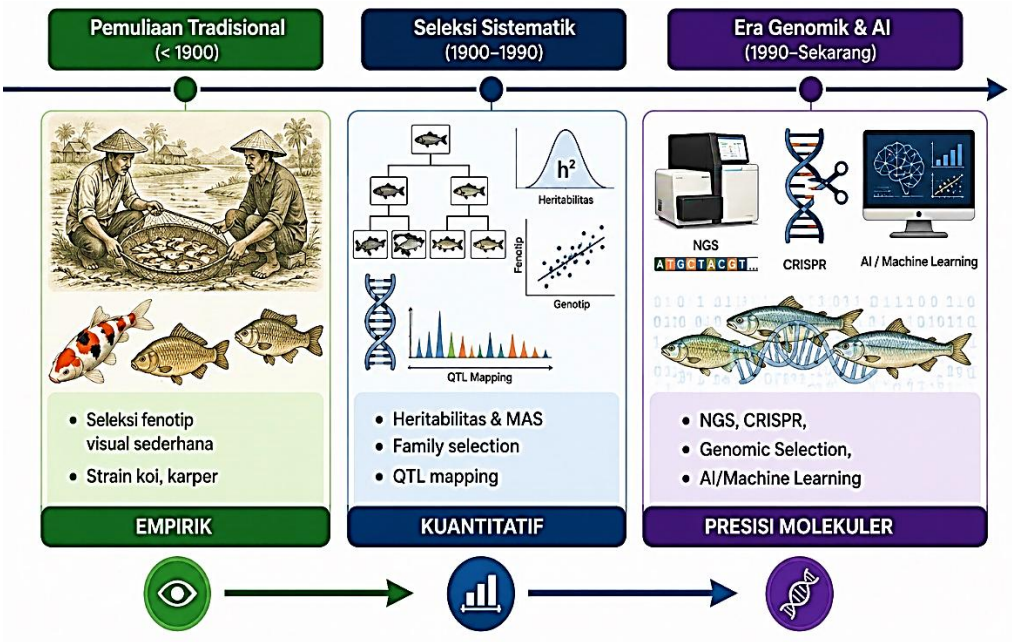
## A. Evolusi Pemuliaan Ikan dalam Akuakultur Berbasis Bioteknologi

Pemuliaan ikan telah mengalami transformasi yang dramatis sepanjang sejarah peradaban manusia. Selama ribuan tahun, budaya pemeliharaan ikan terutama dilakukan dengan memilih individu yang paling unggul berdasarkan penampilan fenotipik semata ukuran tubuh yang besar, warna yang menarik, atau pertumbuhan yang cepat. Praktik pemuliaan tradisional ini, meskipun sederhana, telah menghasilkan beberapa strain ikan budidaya yang dikenal hingga saat ini, seperti koi ornamental yang dikembangkan oleh petani Jepang sejak abad ke-19 (Esteve *et al*., 2022).

Memasuki abad ke-20, pemahaman tentang genetika Mendel mulai diterapkan secara lebih sistematis dalam program pemuliaan hewan, termasuk ikan. Konsep heritabilitas, variasi aditif, dan respons seleksi mulai diintegrasikan ke dalam desain program pemuliaan. Namun, kemajuan yang sesungguhnya terjadi pada dekade 1980-an ketika teknologi DNA rekombinan mulai dapat diaplikasikan pada organisme akuatik (Yáñez *et al*., 2023).

Revolusi genomik yang dimulai dengan selesainya proyek *Human Genome Project* pada tahun 2003 membuka babak baru dalam sejarah pemuliaan ikan. Pengembangan teknologi *sekuensing* generasi berikutnya (*Next Generation Sequencing*/NGS) yang semakin terjangkau dan cepat telah memungkinkan karakterisasi genom ikan secara menyeluruh. Kini, program pemuliaan salmon Atlantik, nila, dan lele di berbagai negara telah mengadopsi pendekatan *genomic selection* yang mampu meningkatkan akurasi prediksi nilai pemuliaan secara signifikan (Ødegård *et al*., 2014; Vallejo *et al*., 2017).

Gambar 1. Timeline Evolusi Pemuliaan Ikan Dari Pendekatan Tradisional Menuju Bioteknologi Presisi




Perubahan dari fase empirik menuju kuantitatif, lalu berkembang menjadi presisi molekuler, menunjukkan bahwa pemuliaan ikan mengalami peningkatan tingkat akurasi dalam mengidentifikasi dan mempertahankan sifat unggul. Jika pada masa awal seleksi dilakukan berdasarkan penampilan luar, maka pada era modern seleksi dapat dilakukan langsung pada tingkat DNA. Perkembangan tersebut memberikan dampak besar terhadap produktivitas akuakultur karena mampu menghasilkan strain ikan yang tumbuh lebih cepat, lebih tahan terhadap penyakit, serta memiliki efisiensi pakan yang lebih baik.

## 1. Pemuliaan Tradisional Berbasis Seleksi Fenotipik

Pada fase awal sebelum tahun 1900, pemuliaan ikan berkembang tanpa landasan ilmu genetika modern. Seluruh proses seleksi sepenuhnya bergantung pada pengamatan visual terhadap karakter fenotipik yang tampak, seperti ukuran tubuh, warna, bentuk morfologi, kecepatan pertumbuhan, serta daya tahan hidup. Dalam konteks ini, pembudidaya berperan sebagai pengambil keputusan utama yang mengandalkan pengalaman empiris, intuisi, serta kebiasaan lokal yang diwariskan secara turun-temurun. Seleksi dilakukan secara sederhana dengan memilih individu yang dianggap paling unggul dari populasi untuk dijadikan induk. Tidak terdapat sistem pencatatan, pengukuran kuantitatif, maupun pemahaman mengenai mekanisme genetika di balik pewarisan sifat. Meskipun demikian, praktik ini tetap dilakukan secara konsisten selama ratusan hingga ribuan tahun di berbagai wilayah budidaya ikan dunia, terutama di Asia Timur dan Eropa, yang memiliki tradisi akuakultur panjang.

Proses seleksi yang berulang tersebut secara tidak langsung menciptakan tekanan seleksi buatan yang perlahan mengarahkan perubahan komposisi genetik populasi. Individu dengan sifat yang dianggap unggul lebih sering dipilih untuk berkembang biak, sehingga karakter tersebut semakin dominan pada generasi berikutnya. Tanpa disadari, mekanisme sederhana ini telah menjadi dasar awal bagi pembentukan strain ikan budidaya modern. Contoh nyata keberhasilan pendekatan ini dapat dilihat pada pengembangan ikan koi di Jepang serta berbagai strain ikan karper di Tiongkok dan Eropa. Strain tersebut terbentuk melalui seleksi jangka panjang yang berfokus pada estetika dan produktivitas. Walaupun tidak memiliki dasar ilmiah genetika, metode ini terbukti efektif sebagai fondasi awal dalam sejarah panjang pemuliaan ikan.

## 2. Awal Genetika Kuantitatif dan Seleksi Sistematik (1900–1990)

Memasuki abad ke-20, perkembangan ilmu genetika yang diawali oleh hukum Mendel mulai memberikan kerangka ilmiah bagi pemuliaan ikan. Konsep pewarisan sifat mulai dipahami secara sistematis, sehingga proses seleksi tidak lagi hanya bergantung pada pengamatan visual, tetapi juga mempertimbangkan faktor genetik yang mendasarinya. Hal ini menandai transisi penting dari pendekatan empiris menuju pendekatan ilmiah.

Pada periode ini, genetika kuantitatif berkembang pesat dan memperkenalkan konsep heritabilitas sebagai ukuran kontribusi genetik terhadap suatu sifat. Melalui konsep ini, pemuliaan ikan mulai dapat diarahkan secara lebih terukur karena sifat-sifat ekonomis seperti pertumbuhan, efisiensi pakan, dan ketahanan penyakit dapat dianalisis secara statistik. Pendekatan ini memberikan dasar yang lebih objektif dalam pengambilan keputusan seleksi. Metode *family selection* kemudian digunakan untuk meningkatkan akurasi seleksi dengan mempertimbangkan performa kelompok keluarga, bukan hanya individu. Pendekatan ini membantu mengurangi bias akibat pengaruh lingkungan, sehingga estimasi nilai genetik menjadi lebih akurat. Dengan demikian, pemuliaan ikan mulai bergerak menuju sistem yang lebih terstruktur dan berbasis data kuantitatif.

Pada tahap lanjut, teknologi *Marker Assisted Selection* (MAS) dan pemetaan *Quantitative Trait Loci* (QTL) mulai diperkenalkan dalam program pemuliaan. MAS memungkinkan identifikasi penanda genetik yang terkait dengan sifat unggul, sedangkan QTL *mapping* membantu menemukan lokasi gen yang berkontribusi terhadap variasi sifat tertentu. Inovasi ini menjadi jembatan penting menuju era pemuliaan berbasis molekuler yang lebih presisi.

### 3. Revolusi Genomik dan Bioteknologi Molekuler (1990–Sekarang)

Periode ini ditandai dengan kemajuan pesat teknologi genomik yang mengubah secara fundamental pendekatan pemuliaan ikan. Salah satu tonggak utama adalah hadirnya *Next Generation Sequencing* (NGS), yang memungkinkan pembacaan seluruh genom organisme secara cepat, akurat, dan dengan biaya yang semakin terjangkau. Teknologi ini membuka akses luas terhadap informasi genetik ikan secara menyeluruh. Dengan tersedianya data genomik dalam skala besar, pendekatan *genomic selection* mulai diterapkan dalam program pemuliaan ikan. Metode ini memungkinkan prediksi nilai genetik individu berdasarkan ribuan hingga jutaan marker DNA secara simultan. Dibandingkan metode konvensional, pendekatan ini memiliki tingkat akurasi yang jauh lebih tinggi karena langsung mempertimbangkan informasi genetik.

Selain itu, teknologi CRISPR-Cas9 memberikan kemampuan baru dalam rekayasa genetika ikan melalui penyuntingan gen secara presisi. Teknologi ini memungkinkan modifikasi langsung terhadap gen

yang berkaitan dengan sifat penting seperti pertumbuhan cepat, ketahanan penyakit, dan adaptasi lingkungan. Dengan demikian, pemuliaan ikan tidak hanya bersifat selektif, tetapi juga bersifat rekayasa pada tingkat molekuler.

Integrasi antara genomik, bioinformatika, dan bioteknologi molekuler menjadikan proses pemuliaan ikan berada pada level presisi tinggi. Seleksi tidak lagi bergantung pada pengamatan fenotipik semata, tetapi pada analisis data biologis yang kompleks dan multidimensi. Hal ini menandai era baru pemuliaan ikan yang berbasis sains molekuler modern.

## B. Peran Bioteknologi dalam Revolusi Akuakultur

Bioteknologi akuakultur mencakup spektrum yang sangat luas, mulai dari penggunaan hormon reproduksi sintetis untuk menginduksi pemijahan, hingga pengaplikasian teknologi CRISPR-Cas9 untuk penyuntingan gen secara presisi. Dalam konteks revolusi akuakultur, bioteknologi berperan sebagai *enabler* yang mempercepat dan meningkatkan efisiensi program pemuliaan secara keseluruhan (Dunham, 2022).

Salah satu kontribusi terbesar bioteknologi adalah kemampuannya dalam mengatasi keterbatasan pemuliaan konvensional. Seleksi fenotipik konvensional umumnya membutuhkan waktu beberapa generasi untuk melihat respons seleksi yang signifikan, sementara teknik *marker-assisted selection* (MAS) memungkinkan identifikasi individu unggul bahkan sebelum karakter fenotipik target terekspresikan (Palaiokostas *et al*., 2016). Hal ini sangat relevan untuk sifat-sifat yang baru dapat diukur pada usia dewasa, seperti ketahanan terhadap penyakit tertentu atau kualitas karkas.

Data dari *Food and Agriculture Organization* (FAO) menunjukkan bahwa produksi akuakultur global telah mencapai 87,5 juta ton pada tahun 2020, melampaui produksi perikanan tangkap untuk pertama kalinya dalam sejarah. Tren ini sangat dipengaruhi oleh adopsi teknologi pemuliaan modern yang meningkatkan laju pertumbuhan ikan budidaya rata-rata 10-15% per generasi pada program-program yang berhasil (FAO, 2022).

Tabel 1. Teknologi Bioteknologi dan Dampaknya Terhadap Produksi Akuakultur (diadaptasi dari Dunham, 2022; FAO, 2022).

| Teknologi Bioteknologi | Aplikasi Utama | Dampak pada Produksi |
|---|---|---|
| *Marker-Assisted Selection* | Seleksi gen ketahanan penyakit | +15-25% survival rate |
| *Genomic Selection* | Prediksi nilai pemuliaan akurat | +10-20% laju pertumbuhan |
| CRISPR-Cas9 | Gene editing presisi | Reduksi penyakit spesifik |
| Cryopreservation | Konservasi plasma nutfah | Preservasi 99%+ viabilitas sperma |
| Sex Reversal | Produksi monoseks | +30-40% uniformitas panen |
| Transgenik | Peningkatan pertumbuhan masif | +2-3x laju pertumbuhan (eksperimental) |
| AI/Big Data | Prediksi genomik terintegrasi | Presisi seleksi >90% akurasi |

Data dalam tabel tersebut menunjukkan bahwa bioteknologi telah mengubah sistem akuakultur dari metode budidaya konvensional menjadi industri berbasis sains dan teknologi tinggi. Perkembangan teknologi pemuliaan modern tidak hanya meningkatkan produktivitas ikan budidaya, tetapi juga mendukung keberlanjutan produksi melalui efisiensi pakan, peningkatan ketahanan penyakit, dan konservasi sumber daya genetik.

## 1. Konsep dan Spektrum Bioteknologi dalam Akuakultur

Bioteknologi dalam akuakultur merupakan penerapan ilmu dan teknologi yang memanfaatkan sistem biologis, organisme hidup, atau komponen biologis untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas budidaya ikan. Ruang lingkupnya sangat luas, mulai dari teknologi sederhana seperti manipulasi lingkungan dan hormon reproduksi, hingga

teknologi tingkat lanjut seperti rekayasa genetika dan penyuntingan gen. Perkembangan ini menunjukkan bahwa bioteknologi tidak lagi hanya bersifat pendukung, tetapi telah menjadi komponen inti dalam sistem akuakultur modern. Dalam praktiknya, bioteknologi berfungsi sebagai enabler yang mempercepat berbagai proses biologis yang sebelumnya berjalan lambat secara alami. Misalnya, proses reproduksi yang secara alami memiliki siklus tertentu dapat dipercepat melalui induksi hormonal, sehingga produksi benih menjadi lebih stabil dan terkontrol. Hal ini sangat penting dalam industri akuakultur yang membutuhkan ketersediaan benih dalam jumlah besar dan berkelanjutan.

Selain itu, bioteknologi juga memungkinkan integrasi lintas disiplin antara biologi, genetika, kimia, dan teknologi informasi. Integrasi ini menciptakan pendekatan baru dalam pengelolaan akuakultur yang lebih presisi, efisien, dan berbasis data. Dengan demikian, bioteknologi menjadi fondasi utama dalam transformasi akuakultur menuju sistem produksi yang lebih modern dan berkelanjutan.

## 2. Bioteknologi sebagai Solusi Keterbatasan Pemuliaan Konvensional

Pemuliaan konvensional pada dasarnya memiliki beberapa keterbatasan utama, terutama terkait dengan waktu yang lama untuk memperoleh respon seleksi yang signifikan. Pada metode tradisional, perbaikan sifat unggul seperti pertumbuhan dan ketahanan penyakit membutuhkan beberapa generasi, sehingga prosesnya relatif lambat dan kurang efisien dalam memenuhi kebutuhan industri yang terus meningkat.

Bioteknologi hadir sebagai solusi untuk mempercepat proses tersebut melalui pendekatan molekuler. Salah satu contohnya adalah *Marker-Assisted Selection* (MAS), yang memungkinkan identifikasi individu unggul berdasarkan penanda genetik sejak tahap awal kehidupan. Dengan cara ini, seleksi tidak perlu menunggu ekspresi fenotipik secara penuh, sehingga waktu seleksi dapat dipersingkat secara signifikan.

Selain mempercepat proses, bioteknologi juga meningkatkan akurasi seleksi karena berbasis data genetik yang lebih objektif. Faktor lingkungan yang sering mengganggu penilaian pada metode konvensional dapat diminimalkan dengan pendekatan molekuler. Hal ini

menjadikan hasil seleksi lebih konsisten, terukur, dan dapat direplikasi dalam skala besar.

### 3. Dampak Bioteknologi terhadap Produktivitas Akuakultur Global

Perkembangan bioteknologi memberikan dampak yang sangat besar terhadap peningkatan produksi akuakultur global. Data *Food and Agriculture Organization* (FAO) menunjukkan bahwa produksi akuakultur dunia telah mencapai 87,5 juta ton pada tahun 2020 dan untuk pertama kalinya melampaui perikanan tangkap. Pencapaian ini tidak terlepas dari kontribusi teknologi pemuliaan modern yang semakin luas diterapkan di berbagai negara.

Salah satu dampak paling nyata adalah peningkatan laju pertumbuhan ikan budidaya yang mencapai rata-rata 10–15% per generasi pada program pemuliaan yang telah mengadopsi bioteknologi. Peningkatan ini memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan karena waktu produksi menjadi lebih singkat dan hasil panen lebih tinggi. Selain itu, efisiensi penggunaan pakan juga meningkat sehingga biaya produksi dapat ditekan.

Bioteknologi juga berkontribusi dalam menurunkan tingkat mortalitas akibat penyakit serta meningkatkan kualitas produk akhir. Ikan yang dihasilkan dari program pemuliaan modern cenderung lebih seragam, lebih sehat, dan memiliki nilai jual yang lebih tinggi. Dengan demikian, bioteknologi tidak hanya meningkatkan kuantitas produksi, tetapi juga kualitas dan keberlanjutan sistem akuakultur global.

### 4. Aplikasi Teknologi Bioteknologi dalam Pemuliaan Ikan Modern

Aplikasi bioteknologi dalam pemuliaan ikan modern mencakup berbagai teknologi yang memiliki fungsi spesifik dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi. *Marker-Assisted Selection* (MAS) digunakan untuk mengidentifikasi individu yang memiliki gen ketahanan penyakit sejak dini, sehingga mampu meningkatkan *survival rate* sebesar 15–25%. Teknologi ini sangat efektif dalam mengurangi risiko kerugian akibat wabah penyakit dalam budidaya.

*Genomic Selection* merupakan pengembangan lanjutan yang menggunakan ribuan penanda DNA untuk memprediksi nilai genetik secara lebih akurat. Teknologi ini mampu meningkatkan laju pertumbuhan ikan sebesar 10–20% serta meningkatkan efisiensi seleksi

dalam skala industri. Dengan pendekatan ini, proses pemuliaan menjadi lebih cepat, tepat, dan berbasis prediksi genetik yang kuat.

CRISPR-Cas9 digunakan sebagai alat penyuntingan gen yang memungkinkan perubahan langsung pada DNA untuk menghasilkan sifat unggul tertentu. *Cryopreservation* berperan dalam menjaga keberlanjutan sumber daya genetik melalui penyimpanan material reproduksi dengan tingkat viabilitas tinggi. Sementara itu, teknologi sex *reversal* digunakan untuk menghasilkan populasi *monoseks* yang meningkatkan keseragaman panen hingga 30–40%, terutama pada spesies ekonomis seperti nila.

Teknologi transgenik memungkinkan penyisipan gen asing untuk meningkatkan pertumbuhan ikan hingga dua hingga tiga kali lipat, meskipun penerapannya masih terbatas oleh regulasi dan isu penerimaan publik. Di sisi lain, *Artificial Intelligence* (AI) dan *Big Data* berperan dalam menganalisis data kompleks dari genomik dan lingkungan untuk meningkatkan akurasi seleksi hingga lebih dari 90%. Kombinasi berbagai teknologi ini menunjukkan bahwa bioteknologi telah mengubah akuakultur menjadi sistem produksi berbasis sains dan teknologi tinggi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

## C. Tantangan Global Industri Perikanan Budidaya

Industri akuakultur global menghadapi setidaknya lima kelompok tantangan besar yang saling berkaitan. Pertama, tekanan demografis dan kebutuhan pangan yang terus meningkat. Proyeksi populasi dunia yang akan mencapai 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050 (UN, 2022) menuntut peningkatan produksi pangan laut yang signifikan tanpa ekspansi lahan yang tidak berkelanjutan.

Kedua, ancaman penyakit ikan yang semakin beragam dan sulit dikendalikan. Wabah penyakit seperti *Infectious Salmon Anemia* (ISA), *Koi Herpesvirus* (KHV), dan *Early Mortality Syndrome* (EMS) pada udang telah menyebabkan kerugian ekonomi miliaran dolar setiap tahunnya di seluruh dunia (Shinn *et al*., 2015). Pengembangan strain ikan yang resisten terhadap penyakit kini menjadi salah satu prioritas utama program pemuliaan berbasis bioteknologi.

Ketiga, perubahan iklim yang memengaruhi kualitas dan ketersediaan air. Peningkatan suhu air laut, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem telah mengganggu

produktivitas unit-unit budidaya di seluruh dunia (Handisyde *et al*., 2017). Program pemuliaan untuk toleransi terhadap suhu tinggi, salinitas, dan kondisi hipoksia kini menjadi semakin relevan.

Keempat, efisiensi konversi pakan yang masih belum optimal. Biaya pakan berkontribusi 40-70% dari total biaya operasional budidaya ikan, dan feed conversion ratio (FCR) yang tidak efisien merupakan salah satu hambatan utama profitabilitas industri. Pemuliaan untuk efisiensi pakan menjadi target strategis yang menarik perhatian banyak program genetik global (Nguyen, 2016).

Kelima, isu keberlanjutan dan tekanan sosial-lingkungan. Kontroversi seputar ikan transgenik, risiko genetik dari ikan hasil rekayasa terhadap populasi liar, serta regulasi yang berbeda-beda di berbagai negara menciptakan ketidakpastian bagi industri dan peneliti (Van Eenennaam *et al*., 2019).

## 1. Tekanan Demografis dan Kebutuhan Pangan Global

Industri akuakultur global saat ini berada pada posisi yang sangat strategis dalam menjawab kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat. Proyeksi Perserikatan Bangsa-Bangsa (UN, 2022) menunjukkan bahwa populasi dunia akan mencapai sekitar 9,7 miliar jiwa pada tahun 2050. Kondisi ini secara langsung meningkatkan kebutuhan protein hewani, termasuk protein ikan yang memiliki peran penting dalam ketahanan pangan global karena nilai gizinya yang tinggi, ketersediaannya yang luas, serta tingkat penerimaan konsumsi yang tinggi di berbagai negara.

Peningkatan permintaan pangan ini tidak dapat sepenuhnya dipenuhi oleh sektor perikanan tangkap. Sumber daya laut dan perairan darat telah berada pada kondisi eksploitasi tinggi di banyak wilayah, sehingga kapasitas produksi dari perikanan tangkap cenderung stagnan bahkan menurun. Situasi ini menempatkan akuakultur sebagai sektor utama yang diharapkan mampu menggantikan peran perikanan tangkap dalam memenuhi kebutuhan protein hewani global.

Namun demikian, peningkatan produksi akuakultur tidak dapat dilakukan hanya dengan memperluas lahan budidaya. Keterbatasan ruang, tekanan lingkungan, serta isu keberlanjutan mengharuskan adanya pendekatan intensifikasi berbasis teknologi. Dalam konteks ini, pemuliaan ikan berbasis bioteknologi menjadi sangat penting karena mampu menghasilkan strain unggul dengan pertumbuhan lebih cepat,

efisiensi pakan lebih tinggi, serta adaptasi lingkungan yang lebih baik. Dengan demikian, tantangan demografis global justru menjadi pendorong utama inovasi dalam sistem akuakultur modern.

### 2. Ancaman Penyakit Ikan dan *Biosekuriti Global*

Tantangan besar lainnya dalam industri akuakultur adalah meningkatnya kompleksitas dan intensitas penyakit ikan yang terus berkembang. Wabah penyakit seperti *Infectious Salmon Anemia* (ISA), *Koi Herpesvirus* (KHV), dan *Early Mortality Syndrome* (EMS) pada udang telah menimbulkan kerugian ekonomi yang sangat besar di berbagai negara. Dalam banyak kasus, kerugian tersebut tidak hanya terjadi pada tingkat lokal, tetapi dapat menyebar secara luas dan memengaruhi stabilitas produksi nasional bahkan global.

Sistem budidaya intensif yang padat menjadi faktor utama yang mempercepat penyebaran patogen. Kondisi lingkungan yang tertutup dan kepadatan tinggi menciptakan kondisi ideal bagi perkembangan penyakit, sehingga satu kasus infeksi dapat dengan cepat berubah menjadi wabah besar. Hal ini menunjukkan bahwa akuakultur modern memiliki tingkat risiko biologis yang tinggi jika tidak didukung oleh sistem pengelolaan kesehatan ikan yang baik.

Dalam menghadapi kondisi tersebut, pendekatan preventif menjadi semakin penting dibandingkan pendekatan kuratif. Salah satu strategi utama adalah pengembangan strain ikan yang memiliki ketahanan genetik terhadap penyakit tertentu melalui pemuliaan berbasis bioteknologi. Pendekatan ini memungkinkan pengurangan ketergantungan terhadap obat-obatan dan antibiotik, sekaligus meningkatkan stabilitas produksi jangka panjang. Dengan demikian, biosekuriti berbasis genetika menjadi komponen penting dalam sistem akuakultur modern.

### 3. Perubahan Iklim dan Ketidakstabilan Lingkungan Akuatik

Perubahan iklim global memberikan dampak yang signifikan terhadap keberlanjutan sistem akuakultur. Peningkatan suhu air, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem telah menyebabkan ketidakstabilan kondisi lingkungan perairan. Perubahan ini secara langsung memengaruhi fisiologi ikan, termasuk metabolisme, tingkat pertumbuhan, dan kemampuan bertahan hidup.

Peningkatan suhu air, misalnya, dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut yang berakibat pada meningkatnya stres fisiologis ikan. Selain itu, perubahan salinitas akibat intrusi air laut atau perubahan hidrologi juga dapat mengganggu keseimbangan osmotik, terutama pada spesies ikan yang memiliki toleransi lingkungan terbatas. Kondisi ini membuat produktivitas akuakultur menjadi lebih tidak stabil dan sulit diprediksi.

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, program pemuliaan ikan modern mulai mengarahkan seleksi pada sifat-sifat adaptif terhadap lingkungan ekstrem. Sifat seperti toleransi suhu tinggi, ketahanan terhadap kondisi hipoksia, serta kemampuan adaptasi terhadap perubahan salinitas menjadi target utama dalam pengembangan strain unggul. Dengan demikian, pemuliaan ikan berperan penting dalam mendukung adaptasi sektor akuakultur terhadap dampak perubahan iklim global.

**4. Efisiensi Pakan dan Tekanan Ekonomi Produksi**

Efisiensi pakan merupakan salah satu faktor paling menentukan dalam keberlanjutan industri akuakultur karena biaya pakan dapat mencapai 40–70% dari total biaya operasional. *Feed Conversion Ratio* (FCR) menjadi indikator utama dalam menilai efisiensi produksi, di mana nilai FCR yang tinggi menunjukkan rendahnya kemampuan ikan dalam mengonversi pakan menjadi biomassa.

Ketidakefisienan pakan tidak hanya berdampak pada peningkatan biaya produksi, tetapi juga memiliki konsekuensi lingkungan. Sisa pakan yang tidak termanfaatkan dapat mencemari perairan budidaya, meningkatkan beban organik, dan menurunkan kualitas air. Hal ini pada akhirnya dapat memperburuk kesehatan ikan dan meningkatkan risiko penyakit, sehingga menciptakan siklus kerugian dalam sistem budidaya.

Dalam konteks pemuliaan modern, peningkatan efisiensi pakan menjadi salah satu target strategis utama. Seleksi genetik diarahkan untuk menghasilkan strain ikan yang mampu tumbuh lebih cepat dengan konsumsi pakan yang lebih rendah. Dengan demikian, efisiensi pakan tidak hanya menjadi isu ekonomi, tetapi juga menjadi indikator penting dalam keberlanjutan sistem akuakultur secara keseluruhan.

## D. Konsep *Sustainable Genetic Inprovement*

Peningkatan genetik yang berkelanjutan (*sustainable genetic improvement*) merupakan pendekatan holistik yang mengintegrasikan tujuan produktivitas jangka pendek dengan pelestarian keragaman genetik jangka panjang. Konsep ini menekankan bahwa program pemuliaan yang baik tidak hanya berorientasi pada peningkatan performa produksi dalam satu atau dua generasi, tetapi juga harus mempertahankan kapasitas adaptasi genetik populasi terhadap tantangan lingkungan masa depan (Gjedrem & Baranski, 2009).

*Effective Population Size* (Ne) merupakan salah satu parameter kunci dalam manajemen keragaman genetik. Program pemuliaan yang menggunakan jumlah induk yang terlalu sedikit berisiko mempercepat laju inbreeding, yang pada akhirnya akan menurunkan performa dan daya adaptasi populasi. Pedoman umum menyarankan Ne minimal 50-100 individu per generasi untuk mempertahankan variabilitas genetik yang cukup (Gjedrem *et al*., 2012).

Penggunaan teknik genomik modern seperti *single nucleotide polymorphism* (SNP) *array* dan *whole genome sequencing* memungkinkan pemantauan laju *inbreeding* secara lebih akurat dan langsung pada level DNA. Dengan informasi ini, manajer program pemuliaan dapat membuat keputusan pemilihan induk yang lebih tepat untuk menyeimbangkan antara kemajuan genetik dan pemeliharaan keragaman (Meuwissen *et al*., 2016).

### 1. Konsep Dasar Peningkatan Genetik Berkelanjutan

Peningkatan genetik berkelanjutan (*sustainable genetic improvement*) merupakan pendekatan dalam pemuliaan ikan yang menekankan keseimbangan antara peningkatan produktivitas jangka pendek dan pelestarian keragaman genetik jangka panjang. Konsep ini lahir dari kesadaran bahwa program pemuliaan yang hanya mengejar performa tinggi dalam waktu singkat sering kali mengorbankan stabilitas genetik populasi. Akibatnya, meskipun terjadi peningkatan produksi, populasi menjadi lebih rentan terhadap penyakit, perubahan lingkungan, dan penurunan daya adaptasi.

Dalam pendekatan ini, tujuan pemuliaan tidak hanya difokuskan pada peningkatan sifat ekonomis seperti pertumbuhan cepat, efisiensi pakan, atau ketahanan penyakit, tetapi juga mempertahankan kapasitas

adaptif populasi terhadap perubahan lingkungan di masa depan. Hal ini menjadi semakin penting dalam konteks perubahan iklim global, munculnya penyakit baru, serta intensifikasi sistem budidaya yang semakin kompleks. Oleh karena itu, *sustainable genetic improvement* dapat dipahami sebagai strategi jangka panjang yang mengintegrasikan produktivitas dan konservasi genetik secara simultan. Pendekatan ini menuntut desain program pemuliaan yang lebih hati-hati, berbasis data, serta mempertimbangkan dampak lintas generasi.

## 2. Peran *Effective Population Size* (Ne) dalam Konservasi Genetik

*Effective Population Size* (Ne) merupakan parameter kunci dalam menjaga keberlanjutan genetik suatu populasi budidaya ikan. Ne menggambarkan jumlah individu yang secara efektif berkontribusi terhadap generasi berikutnya dalam proses reproduksi, sehingga berbeda dari jumlah populasi aktual yang mungkin jauh lebih besar. Nilai Ne lebih mencerminkan kekuatan genetik nyata dalam mempertahankan variasi genetik dalam populasi.

Jika jumlah induk yang digunakan terlalu sedikit, maka laju inbreeding akan meningkat secara cepat. Inbreeding yang tinggi dapat menyebabkan penurunan kualitas biologis seperti pertumbuhan yang lebih lambat, penurunan daya tahan terhadap penyakit, serta berkurangnya keberhasilan reproduksi. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat mengarah pada penurunan performa populasi secara keseluruhan dan bahkan kegagalan program pemuliaan.

Untuk menjaga stabilitas genetik, pedoman ilmiah umumnya merekomendasikan nilai Ne minimal antara 50 hingga 100 individu per generasi. Nilai ini dianggap cukup untuk mempertahankan variasi genetik yang diperlukan agar populasi tetap adaptif dan tidak mengalami degradasi genetik yang cepat. Dengan menjaga Ne pada tingkat yang memadai, program pemuliaan dapat berjalan secara berkelanjutan tanpa kehilangan potensi genetiknya.

## 3. Integrasi Teknologi Genomik dalam Manajemen *Inbreeding*

Perkembangan teknologi genomik telah membawa perubahan besar dalam pengelolaan keragaman genetik pada program pemuliaan ikan. Teknologi seperti *single nucleotide polymorphism* (SNP) *array* dan *whole genome sequencing* memungkinkan analisis genetik dilakukan langsung pada tingkat DNA dengan resolusi tinggi. Hal ini memberikan

gambaran yang jauh lebih akurat mengenai struktur genetik populasi dibandingkan metode konvensional berbasis silsilah. Dengan pendekatan ini, laju *inbreeding* tidak lagi hanya diperkirakan berdasarkan *pedigree*, tetapi dapat dihitung secara langsung dari data genomik individu. Hal ini memungkinkan deteksi dini terhadap peningkatan kekerabatan genetik yang berpotensi menimbulkan penurunan variasi genetik. Informasi tersebut sangat penting dalam pengambilan keputusan pemilihan induk untuk generasi berikutnya.

Selain itu, analisis genomik juga memungkinkan identifikasi alel atau variasi genetik yang masih jarang dalam populasi, tetapi memiliki nilai penting bagi adaptasi dan ketahanan lingkungan. Dengan demikian, program pemuliaan dapat dirancang untuk menyeimbangkan antara peningkatan performa dan konservasi keragaman genetik. Integrasi teknologi ini menjadikan *sustainable genetic improvement* sebagai pendekatan yang lebih presisi, ilmiah, dan berorientasi jangka panjang.

## E. Integrasi Genetika, Lingkungan, dan Teknologi

Performa suatu organisme pada dasarnya merupakan hasil interaksi antara genotipe dan lingkungan (G×E *interaction*). Dalam konteks akuakultur, pemahaman tentang interaksi G×E sangat penting karena ikan dibudidayakan dalam berbagai kondisi lingkungan yang berbeda mulai dari kolam tanah tradisional di pedesaan hingga sistem resirkulasi akuakultur (RAS) berteknologi tinggi di perkotaan.

Penelitian menunjukkan bahwa galur ikan yang unggul di satu kondisi lingkungan belum tentu menunjukkan performa yang sama di lingkungan lainnya. Studi Genç *et al*. (2022) pada nila menunjukkan adanya *re-ranking* genotipe yang signifikan antara kondisi budidaya intensif dan semi-intensif, yang mengindikasikan interaksi G×E yang tidak dapat diabaikan dalam desain program pemuliaan.

Pendekatan *multi-environment trial* (MET) dan *genomic prediction* yang mempertimbangkan G×E *interaction* kini mulai banyak diadopsi dalam program pemuliaan ikan komersial. Dengan memanfaatkan data fenotipik dari berbagai lingkungan dan informasi genomik individu, model prediksi dapat menghasilkan estimasi nilai pemuliaan yang lebih robust dan akurat untuk berbagai skenario produksi (Lillehammer *et al*., 2013).

Tabel 2. Komponen Integrasi Genetika, Lingkungan, dan Teknologi dalam Akuakultur Modern.

| Komponen | Definisi | Relevansi dalam Akuakultur |
|---|---|---|
| Genotipe (G) | Komposisi genetik individu/populasi | Menentukan potensi genetik maksimum |
| Lingkungan (E) | Kondisi budidaya, pakan, suhu, patogen | Memodulasi ekspresi gen target |
| Interaksi G×E | Respons berbeda genotipe di lingkungan berbeda | Kritis untuk seleksi lingkungan spesifik |
| *Genomic Prediction* | Estimasi nilai pemuliaan dari SNP | Akurasi seleksi tanpa uji performa penuh |
| Plastisitas Fenotipik | Kemampuan adaptasi genotipe | Target pemuliaan untuk ketahanan iklim |

Hubungan antar komponen dalam tabel tersebut menunjukkan bahwa performa ikan budidaya tidak hanya ditentukan oleh kualitas genetik, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan kemampuan adaptasi organisme terhadap perubahan lingkungan tersebut. Integrasi antara genetika, manajemen lingkungan, dan teknologi prediksi genomik memungkinkan program pemuliaan menghasilkan strain ikan yang lebih stabil, produktif, dan adaptif terhadap berbagai sistem budidaya modern. Dengan memahami interaksi G×E secara mendalam, program pemuliaan masa depan dapat dirancang untuk menghasilkan strain ikan yang tidak hanya unggul dalam kondisi ideal, tetapi juga memiliki plastisitas fenotipik yang cukup untuk beradaptasi terhadap variasi kondisi budidaya dan perubahan lingkungan yang tidak terduga (Mulder, 2016).

## 1. Konsep Interaksi Genotipe dan Lingkungan (G×E)

Performa organisme dalam akuakultur pada dasarnya merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik (genotipe) dan faktor lingkungan. Konsep ini dikenal sebagai *Genotype × Environment interaction* (G×E), yang menjelaskan bahwa ekspresi suatu sifat tidak

hanya ditentukan oleh gen, tetapi juga oleh kondisi lingkungan tempat organisme tersebut dibudidayakan. Dalam konteks akuakultur modern, konsep ini menjadi sangat penting karena sistem budidaya ikan sangat beragam, mulai dari kolam tradisional sederhana di pedesaan hingga sistem resirkulasi akuakultur (RAS) yang sangat terkontrol dan berteknologi tinggi.

Setiap sistem budidaya memiliki karakteristik lingkungan yang berbeda, seperti kualitas air, suhu, kadar oksigen, kepadatan tebar, serta tingkat paparan patogen. Perbedaan ini menyebabkan respons genetik ikan terhadap lingkungan juga berbeda. Dengan kata lain, genotipe yang unggul di satu sistem budidaya belum tentu menunjukkan performa yang sama pada sistem lain. Hal ini menunjukkan bahwa seleksi genetik tidak dapat dilakukan secara universal tanpa mempertimbangkan konteks lingkungan produksi. Oleh karena itu, pemahaman tentang G×E menjadi dasar penting dalam desain program pemuliaan ikan modern. Tanpa mempertimbangkan interaksi ini, hasil seleksi berisiko tidak relevan dengan kondisi budidaya aktual di lapangan, sehingga mengurangi efektivitas program peningkatan genetik.

## 2. Variabilitas Performa Genotipe pada Berbagai Lingkungan Budidaya

Penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa terdapat variasi yang signifikan dalam performa genotipe ikan ketika diuji pada lingkungan yang berbeda. Studi Genç *et al*. (2022) pada ikan nila menunjukkan adanya fenomena re-ranking genotipe, yaitu perubahan urutan peringkat performa genetik ketika ikan dipelihara pada sistem intensif dibandingkan dengan sistem semi-intensif. Fenomena ini mengindikasikan bahwa efek lingkungan dapat mengubah ekspresi potensi genetik secara signifikan.

Re-ranking genotipe menjadi bukti kuat bahwa seleksi yang dilakukan pada satu jenis lingkungan tidak selalu dapat diekstrapolasi ke lingkungan lain. Hal ini menimbulkan tantangan dalam program pemuliaan, terutama ketika strain ikan dikembangkan untuk pasar atau wilayah geografis yang memiliki kondisi budidaya beragam. Dalam konteks ini, strategi seleksi yang tidak mempertimbangkan variasi lingkungan dapat menghasilkan strain yang kurang adaptif.

Akibatnya, program pemuliaan modern mulai mengarah pada pendekatan yang lebih spesifik, yaitu pengembangan strain yang

disesuaikan dengan kondisi lingkungan target. Pendekatan ini memungkinkan hasil seleksi menjadi lebih relevan, stabil, dan aplikatif di berbagai sistem produksi akuakultur.

### 3. Pendekatan *Multi-Environment Trial* (MET) dan *Genomic Prediction*

Untuk mengatasi kompleksitas interaksi G×E, pendekatan *Multi-Environment Trial* (MET) mulai banyak digunakan dalam program pemuliaan ikan. MET dilakukan dengan menguji performa genotipe yang sama pada berbagai kondisi lingkungan budidaya. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk melihat stabilitas performa genetik serta respons terhadap variasi lingkungan.

Selain MET, pendekatan *genomic prediction* juga mulai diintegrasikan dalam analisis G×E. Metode ini menggunakan informasi marker genetik, seperti *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP), untuk memprediksi nilai pemuliaan individu tanpa harus menunggu hasil uji performa penuh. Dengan demikian, proses seleksi dapat dilakukan lebih cepat dan efisien, terutama pada tahap awal kehidupan ikan.

Ketika MET dan *genomic prediction* digabungkan, model prediksi yang dihasilkan menjadi lebih robust karena mempertimbangkan variasi lingkungan sekaligus informasi genetik. Pendekatan ini memungkinkan estimasi nilai pemuliaan yang lebih akurat untuk berbagai skenario budidaya, sehingga hasil seleksi lebih fleksibel dan aplikatif dalam kondisi nyata di lapangan.



# BAB II
# DASAR-DASAR GENETIKA DAN PEWARISAN SIFAT PADA IKAN

## A. Struktur DNA dan Genom Ikan

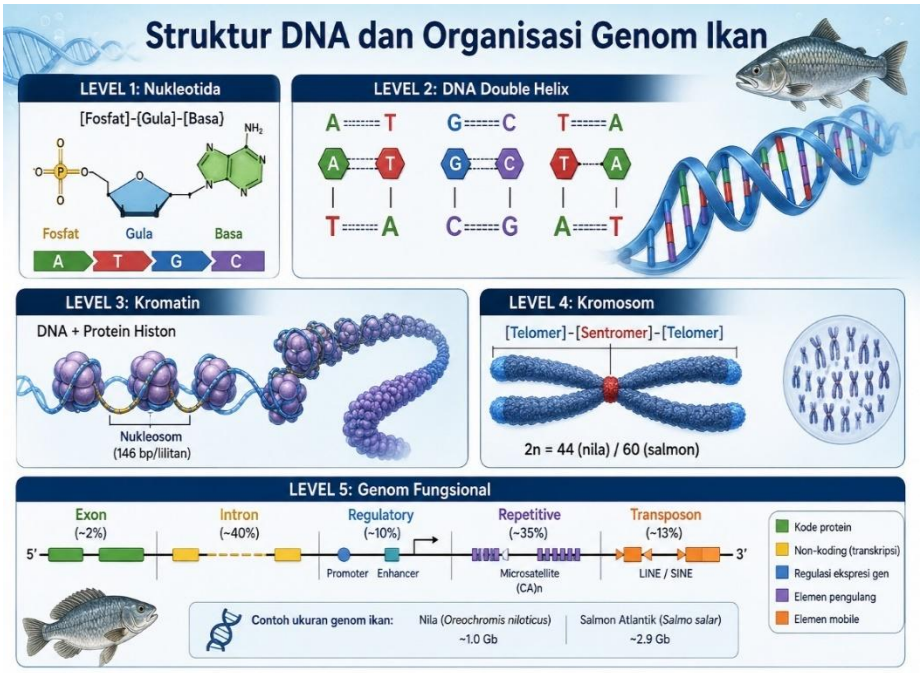
Asam deoksiribonukleat (DNA) merupakan molekul fundamental yang menyimpan seluruh informasi genetik makhluk hidup, termasuk ikan. DNA tersusun dari dua untai polinukleotida yang membentuk struktur heliks ganda (*double helix*), di mana setiap nukleotida terdiri dari gugus fosfat, gula deoksiribosa, dan salah satu dari empat basa nitrogen: adenin (A), timin (T), guanin (G), dan sitosin (C). Pasangan basa komplementer (A-T dan G-C) membentuk ikatan hidrogen yang menstabilkan struktur heliks ganda (Watson & Crick, 1953; Alberts *et al*., 2022).

Ikan memiliki keragaman ukuran dan kompleksitas genom yang sangat tinggi dibandingkan kelompok vertebrata lainnya. Ukuran genom ikan bertulang (*Osteichthyes*) berkisar dari sekitar 0,4 pg untuk beberapa spesies pufferfish hingga lebih dari 100 pg pada beberapa spesies salamander dan lungfish. Ikan nila (*Oreochromis niloticus*) memiliki genom berukuran sekitar 1,0 Gb yang terdiri dari 22 pasang kromosom, sementara ikan salmon Atlantik (Salmo salar) memiliki genom yang jauh lebih besar (~3 Gb) akibat peristiwa poliploidisasi ancestral (Lien *et al*., 2016).

Kemajuan teknologi sekuensing telah memungkinkan karakterisasi lengkap genom berbagai spesies ikan penting dalam akuakultur. Referensi genom yang telah dipublikasikan mencakup nila

(*Oreochromis niloticus*), lele Afrika (*Clarias gariepinus*), lele channel (*Ictalurus punctatus*), bandeng (*Chanos chanos*), kerapu (*Epinephelus spp*.), dan berbagai spesies salmon. Informasi ini menjadi fondasi penting bagi pengembangan program *genomic selection* dan *gene editing* (Bowen *et al*., 2020).

Gambar 2. Hierarki Organisasi Struktural DNA dan Genom Pada Ikan Budidaya




Gambar 2 menjelaskan hierarki organisasi DNA dan genom ikan mulai dari unit molekuler terkecil hingga struktur genom fungsional yang kompleks. Setiap level menunjukkan bagaimana informasi genetik disusun, dikemas, dan diatur sehingga dapat menjalankan fungsi biologis pada organisme ikan.

Distribusi komponen genom tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar DNA ikan bukan hanya berfungsi sebagai pengkode protein, tetapi juga memiliki peran penting dalam regulasi, stabilitas genom, dan adaptasi evolusioner. Pemahaman mengenai struktur dan organisasi genom menjadi dasar utama dalam pengembangan teknologi genomic selection, marker-assisted selection, serta rekayasa genetika pada ikan budidaya. Dengan memahami susunan genom secara rinci,

peneliti dapat mengidentifikasi gen-gen penting yang berkaitan dengan pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pakan, dan toleransi lingkungan pada spesies akuakultur modern.

## 1. Struktur Dasar DNA sebagai Materi Genetik

Asam deoksiribonukleat atau DNA merupakan molekul biologis utama yang menyimpan seluruh informasi genetik pada organisme hidup, termasuk ikan. DNA berfungsi sebagai pusat penyimpanan instruksi biologis yang mengatur seluruh aktivitas seluler, mulai dari pertumbuhan, metabolisme, reproduksi, hingga respons terhadap lingkungan. Dalam konteks akuakultur, DNA menjadi dasar utama dalam memahami pewarisan sifat unggul dan pengembangan teknologi pemuliaan modern. Secara struktural, DNA tersusun atas dua untai polinukleotida yang membentuk struktur heliks ganda (*double helix*). Setiap untai terdiri atas rangkaian nukleotida yang saling terhubung melalui ikatan fosfodiester. Nukleotida sendiri tersusun atas tiga komponen utama, yaitu gugus fosfat, gula deoksiribosa, dan basa nitrogen. Basa nitrogen pada DNA terdiri atas empat jenis, yaitu adenin (A), timin (T), guanin (G), dan sitosin (C).

Pasangan basa pada DNA bersifat komplementer, di mana adenin selalu berpasangan dengan timin (A-T), sedangkan guanin berpasangan dengan sitosin (G-C). Ikatan hidrogen yang terbentuk antar pasangan basa menjaga stabilitas struktur heliks ganda. Susunan urutan basa nitrogen inilah yang menjadi kode genetik yang menentukan sintesis protein dan berbagai karakter biologis pada ikan. Dalam genom ikan, miliaran nukleotida tersusun secara spesifik membentuk informasi biologis yang sangat kompleks. Variasi kecil dalam urutan basa dapat menyebabkan perbedaan sifat, seperti laju pertumbuhan, ketahanan penyakit, warna tubuh, maupun toleransi terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai struktur dasar DNA menjadi fondasi penting dalam genetika dan bioteknologi akuakultur.

## 2. Organisasi DNA Menjadi Kromatin dan Kromosom

DNA pada sel ikan tidak berada dalam keadaan bebas, tetapi mengalami proses pengemasan yang sangat terorganisasi agar dapat dimuat di dalam inti sel yang berukuran sangat kecil. Pengemasan ini dimulai dengan pembentukan kromatin, yaitu kompleks antara DNA dan

protein histon. DNA melilit protein histon membentuk struktur nukleosom yang menjadi unit dasar kromatin.

Setiap nukleosom terdiri atas sekitar 146 pasangan basa DNA yang melilit inti protein histon. Struktur ini memungkinkan DNA yang sangat panjang dapat dikemas secara efisien tanpa mengalami kerusakan. Selain fungsi pengemasan, kromatin juga memiliki peran penting dalam pengaturan ekspresi gen. Daerah kromatin yang lebih terbuka cenderung aktif secara transkripsi, sedangkan daerah yang padat umumnya bersifat tidak aktif.

Ketika sel mengalami pembelahan, kromatin akan mengalami kondensasi lebih lanjut membentuk kromosom. Kromosom merupakan struktur genetik yang membawa informasi hereditas dan dapat diamati secara jelas pada fase tertentu pembelahan sel. Setiap kromosom memiliki bagian penting seperti telomer dan sentromer. Telomer berfungsi melindungi ujung kromosom dari degradasi, sedangkan sentromer berperan dalam distribusi kromosom selama pembelahan sel.

Jumlah kromosom berbeda pada setiap spesies ikan. Ikan nila memiliki jumlah kromosom diploid 2n = 44, sedangkan salmon Atlantik memiliki 2n = 60. Perbedaan jumlah dan struktur kromosom ini mencerminkan tingginya keragaman evolusi genom ikan. Pada beberapa spesies seperti salmon, terjadi peristiwa poliploidisasi ancestral yang menyebabkan genom menjadi lebih besar dan kompleks dibandingkan spesies lainnya.

## B. Hukum Pewarisan Mendel pada Organisme Akuatik

Gregor Johann Mendel (1822-1884) menemukan prinsip-prinsip dasar pewarisan sifat melalui eksperimen persilangannya pada tanaman kacang polong. Meskipun ditemukan pada tanaman, hukum-hukum Mendel berlaku universal untuk seluruh organisme yang bereproduksi secara seksual, termasuk ikan. Hukum pertama (Segregasi) menyatakan bahwa dua alel yang menentukan suatu sifat akan terpisah selama pembentukan gamet, sehingga setiap gamet hanya mengandung satu alel. Hukum kedua (Asortasi Bebas) menyatakan bahwa gen-gen yang terletak pada kromosom berbeda akan diwariskan secara independen satu sama lain (Griffiths *et al*., 2020).

Penerapan hukum Mendel pada ikan dapat diilustrasikan dengan berbagai contoh. Pada ikan nila, warna tubuh merah (OO atau Oo)

bersifat dominan terhadap warna hitam (oo), di mana alel O adalah gen orange/red yang bersifat dominan. Persilangan antara nila merah homozigot (OO) dengan nila hitam (oo) akan menghasilkan keturunan F1 seluruhnya berwarna merah (Oo), sedangkan persilangan F1 × F1 akan menghasilkan rasio fenotipik 3 merah : 1 hitam (Mair *et al*., 1991).

Namun, tidak semua sifat penting dalam akuakultur mengikuti pola pewarisan Mendel yang sederhana. Sebagian besar sifat produksi seperti laju pertumbuhan, efisiensi pakan, ketahanan terhadap penyakit, dan kualitas daging merupakan sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen (poligenik) dengan kontribusi masing-masing yang kecil, ditambah pengaruh lingkungan yang signifikan. Sifat-sifat ini mengikuti distribusi normal dan menjadi objek studi genetika kuantitatif (Falconer & Mackay, 1996).

Tabel 3. Jenis-Jenis Pewarisan Sifat dan Relevansinya dalam Program Pemuliaan Ikan.

| **Jenis Pewarisan** | **Karakteristik** | **Contoh pada Ikan** | **Relevansi Pemuliaan** |
|---|---|---|---|
| Monohibrid Dominan | Satu gen, 2 alel, rasio 3:1 | Warna nila merah/hitam | Seleksi sederhana, cepat |
| Kodominansi | Kedua alel terekspresi bersamaan | Golongan darah ikan | Marker tidak langsung |
| Epistasis | Gen saling mempengaruhi ekspresi | Pola warna koi | Kompleks, sulit diprediksi |
| Poligenik/Kuantitatif | Banyak gen, distribusi normal | Bobot badan, pertumbuhan | Genomic selection, QTL |
| Sex-linked | Gen terkait kromosom seks | Resistensi VHS pada salmon | Marker sex-spesifik |

| Jenis Pewarisan | Karakteristik | Contoh pada Ikan | Relevansi Pemuliaan |
|---|---|---|---|
| Maternal | Diturunkan via sitoplasma | Morfologi mitokondria | Pelacakan garis betina |

Keberagaman pola pewarisan tersebut menunjukkan bahwa sifat pada ikan tidak selalu dikendalikan oleh mekanisme genetik sederhana. Ada sifat yang mudah diprediksi melalui hukum Mendel klasik, tetapi ada pula sifat yang dipengaruhi interaksi banyak gen dan faktor lingkungan. Pemahaman terhadap jenis-jenis pewarisan ini menjadi dasar penting dalam menentukan metode seleksi, desain persilangan, serta penggunaan teknologi molekuler dalam program pemuliaan ikan modern.

## 1. Prinsip Dasar Hukum Mendel dalam Pewarisan Sifat

Gregor Johann Mendel merupakan ilmuwan yang pertama kali menjelaskan prinsip dasar pewarisan sifat melalui eksperimen persilangan tanaman kacang polong pada abad ke-19. Hasil penelitiannya melahirkan dua hukum utama genetika, yaitu Hukum Segregasi dan Hukum Asortasi Bebas. Meskipun penelitian Mendel dilakukan pada tanaman, prinsip-prinsip tersebut berlaku universal pada hampir seluruh organisme yang bereproduksi secara seksual, termasuk ikan dan organisme akuatik lainnya. Hukum Segregasi menyatakan bahwa setiap individu memiliki dua alel untuk suatu sifat, dan kedua alel tersebut akan terpisah selama pembentukan gamet. Akibatnya, setiap gamet hanya membawa satu alel dari pasangan gen tersebut. Ketika fertilisasi terjadi, alel dari induk jantan dan betina akan bergabung kembali membentuk kombinasi genetik baru pada keturunannya.

Sementara itu, Hukum Asortasi Bebas menyatakan bahwa gen-gen yang terletak pada kromosom berbeda diwariskan secara independen satu sama lain. Dengan kata lain, pewarisan suatu sifat tidak selalu memengaruhi pewarisan sifat lainnya. Prinsip ini menjadi dasar penting dalam memahami kombinasi sifat pada hasil persilangan ikan budidaya. Dalam akuakultur modern, hukum Mendel menjadi fondasi utama dalam program pemuliaan ikan karena membantu menjelaskan pola pewarisan berbagai karakter biologis. Pemahaman terhadap prinsip ini

memungkinkan peneliti memprediksi hasil persilangan dan menentukan strategi seleksi yang lebih efektif.

## 2. Pewarisan Monohibrid Dominan pada Ikan

Salah satu bentuk pewarisan paling sederhana adalah monohibrid dominan, yaitu pewarisan sifat yang dikendalikan oleh satu gen dengan dua alel, di mana satu alel bersifat dominan terhadap alel lainnya. Pada pola ini, alel dominan akan tetap terekspresi baik dalam kondisi homozigot maupun heterozigot. Contoh yang sering dijumpai pada ikan adalah warna tubuh nila merah dan nila hitam. Alel warna merah bersifat dominan terhadap warna hitam. Jika ikan nila merah homozigot (OO) disilangkan dengan nila hitam homozigot resesif (oo), maka seluruh keturunan generasi pertama (F1) akan memiliki genotipe heterozigot (Oo) dan menampilkan warna merah.

Ketika individu F1 disilangkan sesamanya, maka pada generasi kedua (F2) akan muncul rasio fenotipik sekitar 3 merah : 1 hitam sesuai dengan hukum segregasi Mendel. Rasio ini menunjukkan bahwa sifat resesif dapat kembali muncul apabila kedua alel resesif bertemu dalam satu individu. Dalam program pemuliaan ikan, pola pewarisan monohibrid sangat menguntungkan karena proses seleksi dapat dilakukan dengan mudah melalui pengamatan fenotipik. Karakter yang dikendalikan satu gen umumnya lebih mudah diprediksi dibandingkan sifat yang melibatkan banyak gen.

## 3. Variasi Pola Pewarisan Non-Mendelian pada Ikan

Meskipun hukum Mendel menjelaskan banyak pola pewarisan sifat, tidak semua karakter pada ikan mengikuti mekanisme Mendel sederhana. Terdapat berbagai pola pewarisan lain yang lebih kompleks akibat interaksi antargen maupun keterlibatan faktor genetik tambahan. Salah satu pola tersebut adalah kodominansi, yaitu kondisi ketika kedua alel terekspresi secara bersamaan pada individu heterozigot. Pada pola ini, tidak ada alel yang benar-benar dominan atau resesif. Contohnya dapat ditemukan pada beberapa sistem marker protein atau golongan darah ikan. Pola kodominansi sangat penting dalam genetika molekuler karena membantu identifikasi gen dan pelacakan alel tertentu.

Pola lain adalah epistasis, yaitu interaksi antargen di mana satu gen dapat memengaruhi atau menutupi ekspresi gen lain pada lokus berbeda. Contoh yang sering ditemukan adalah pola warna koi yang

dikendalikan oleh kombinasi banyak gen. Interaksi ini menyebabkan variasi warna menjadi sangat kompleks dan sulit diprediksi hanya dengan rasio Mendel sederhana. Selain itu, terdapat pewarisan sex-linked yang berkaitan dengan kromosom seks. Pada beberapa spesies ikan, gen tertentu yang berkaitan dengan ketahanan penyakit atau karakter reproduksi berada pada kromosom seks. Ada pula maternal inheritance, yaitu pewarisan melalui DNA mitokondria yang hampir seluruhnya diturunkan dari induk betina. Pola-pola ini menunjukkan bahwa genetika ikan memiliki kompleksitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan konsep Mendel dasar.

## 4. Pewarisan Poligenik dan Genetika Kuantitatif dalam Akuakultur

Sebagian besar sifat penting dalam akuakultur sebenarnya tidak dikendalikan oleh satu gen tunggal, melainkan oleh banyak gen yang bekerja secara bersama-sama. Sifat seperti laju pertumbuhan, bobot badan, efisiensi pakan, ketahanan penyakit, dan kualitas daging termasuk dalam kategori sifat poligenik atau kuantitatif. Pada sifat kuantitatif, setiap gen memberikan kontribusi kecil terhadap fenotip total, sehingga pola pewarisannya tidak mengikuti rasio Mendel sederhana. Selain dipengaruhi oleh banyak gen, sifat kuantitatif juga sangat dipengaruhi oleh lingkungan seperti kualitas air, suhu, pakan, dan kepadatan budidaya. Akibatnya, distribusi sifat kuantitatif biasanya mengikuti pola distribusi normal.

Dalam akuakultur modern, sifat kuantitatif menjadi fokus utama program pemuliaan karena berkaitan langsung dengan produktivitas budidaya. Untuk menganalisis sifat-sifat kompleks tersebut, digunakan pendekatan genetika kuantitatif yang mengombinasikan data genetik dan statistik. Perkembangan teknologi molekuler memungkinkan identifikasi *Quantitative Trait Loci* (QTL) dan penerapan *genomic selection* untuk meningkatkan akurasi seleksi terhadap sifat kuantitatif. Dengan pendekatan ini, pemuliaan ikan tidak lagi hanya mengandalkan pengamatan fenotipik, tetapi juga memanfaatkan informasi genomik untuk mempercepat peningkatan genetik populasi budidaya.

## C. Variabilitas Genetik Populasi Ikan

Variabilitas genetik merupakan substrat bagi seleksi alam dan seleksi buatan. Tanpa variasi genetik yang cukup, tidak ada kemajuan yang dapat dicapai melalui program seleksi. Populasi ikan dalam kondisi alami umumnya memiliki tingkat heterozigositas yang cukup tinggi sebagai hasil jutaan tahun evolusi, namun kondisi ini dapat berubah drastis pada populasi yang diintroduksi atau dipelihara dalam kondisi budidaya dalam waktu yang lama (Reed & Frankham, 2003).

Pengukuran variabilitas genetik dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan. Analisis microsatellite (SSR) telah lama digunakan sebagai alat standar untuk mengukur *heterozigositas, allelic richness*, dan diferensiasi genetik antar populasi (FST). Kini, pendekatan berbasis SNP yang menganalisis ribuan hingga jutaan titik polimorfisme secara simultan memberikan resolusi yang jauh lebih tinggi (Helyar *et al*., 2011; Ogden *et al*., 2013).

Parameter-parameter statistik populasi genetik yang umum digunakan dalam analisis variabilitas mencakup: heterozigositas harapan (He), heterozigositas terobservasi (Ho), koefisien inbreeding (F), indeks fiksasi (FST), jarak genetik Nei, dan *effective population size* (Ne). Pemahaman terhadap parameter-parameter ini esensial bagi perencana program pemuliaan untuk memastikan bahwa populasi dasar memiliki keragaman genetik yang cukup (Allendorf *et al*., 2013).

### 1. Konsep Variabilitas Genetik pada Populasi Ikan

Variabilitas genetik merupakan tingkat keragaman materi genetik yang terdapat di antara individu-individu dalam suatu populasi. Pada populasi ikan, variabilitas genetik menggambarkan adanya perbedaan susunan gen atau alel yang dimiliki oleh setiap individu dalam suatu spesies. Keragaman genetik ini menjadi salah satu komponen terpenting dalam genetika populasi karena menentukan kemampuan suatu populasi untuk beradaptasi terhadap perubahan lingkungan, mempertahankan kelangsungan hidup, serta mendukung proses evolusi dalam jangka panjang. Populasi ikan yang memiliki variabilitas genetik tinggi cenderung lebih mampu menghadapi berbagai tekanan lingkungan, seperti perubahan suhu, salinitas, kualitas perairan, ketersediaan pakan, maupun serangan patogen. Sebaliknya, populasi dengan tingkat keragaman genetik yang rendah memiliki risiko lebih besar mengalami

penurunan kemampuan adaptasi dan rentan terhadap gangguan lingkungan.

Secara biologis, variabilitas genetik muncul akibat adanya perbedaan urutan *DNA* di antara individu-individu dalam suatu populasi. Variasi tersebut dapat terjadi pada tingkat nukleotida, gen, maupun kromosom. Sumber utama pembentukan keragaman genetik meliputi mutasi, rekombinasi genetik selama proses meiosis, reproduksi seksual, serta perpindahan gen antar populasi yang dikenal sebagai *gene flow*. Mutasi menghasilkan perubahan permanen pada materi genetik yang dapat menciptakan alel baru dalam populasi. Rekombinasi genetik selama pembentukan gamet memungkinkan terjadinya pertukaran materi genetik antar kromosom homolog sehingga menghasilkan kombinasi gen yang berbeda pada setiap keturunan. Selain itu, proses fertilisasi yang menggabungkan gamet jantan dan betina secara acak juga berkontribusi dalam menghasilkan individu dengan komposisi genetik yang unik. Oleh karena itu, meskipun berasal dari induk yang sama, setiap ikan umumnya memiliki karakteristik genetik yang berbeda.

Dalam kajian genetika populasi, variabilitas genetik biasanya diukur menggunakan beberapa parameter, seperti frekuensi alel, heterozigositas, jumlah alel per lokus, dan tingkat polimorfisme genetik. Heterozigositas merupakan salah satu indikator yang paling sering digunakan karena mampu menggambarkan tingkat keberagaman genetik dalam suatu populasi. Semakin tinggi nilai heterozigositas, semakin besar tingkat keragaman genetik yang dimiliki oleh populasi tersebut. Sebaliknya, nilai heterozigositas yang rendah menunjukkan adanya keseragaman genetik yang lebih tinggi. Perkembangan biologi molekuler telah memungkinkan pengukuran variabilitas genetik secara lebih akurat melalui penggunaan berbagai penanda molekuler, seperti *microsatellite*, *Random Amplified Polymorphic DNA* (*RAPD*), *Amplified Fragment Length Polymorphism* (*AFLP*), *Single Nucleotide Polymorphism* (*SNP*), serta analisis *DNA* mitokondria. Saat ini, teknologi *Next Generation Sequencing* (*NGS*) juga semakin banyak digunakan untuk mengidentifikasi variasi genetik secara menyeluruh pada tingkat genom.

Variabilitas genetik memiliki peran yang sangat penting dalam proses adaptasi dan seleksi alam pada populasi ikan liar. Lingkungan perairan merupakan ekosistem yang dinamis dan terus mengalami perubahan, baik akibat faktor alami maupun aktivitas manusia. Dalam

kondisi tersebut, individu-individu yang memiliki kombinasi genetik yang lebih sesuai dengan lingkungan akan memiliki peluang hidup dan reproduksi yang lebih tinggi dibandingkan individu lainnya. Melalui mekanisme seleksi alam, gen-gen yang memberikan keuntungan adaptif akan diwariskan kepada generasi berikutnya sehingga frekuensinya meningkat dalam populasi. Dengan demikian, keragaman genetik berfungsi sebagai sumber variasi yang memungkinkan populasi merespons perubahan lingkungan secara efektif. Tanpa adanya keragaman genetik yang memadai, kemampuan populasi untuk beradaptasi akan menurun sehingga risiko kepunahan menjadi lebih besar.

Dalam bidang budidaya perikanan, variabilitas genetik merupakan sumber daya yang sangat berharga karena menjadi dasar pelaksanaan program pemuliaan ikan. Program seleksi bertujuan untuk meningkatkan frekuensi gen-gen yang berkaitan dengan sifat unggul, seperti pertumbuhan cepat, efisiensi penggunaan pakan, ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap stres lingkungan, kualitas daging yang baik, dan tingkat reproduksi yang tinggi. Keberhasilan program pemuliaan sangat bergantung pada ketersediaan keragaman genetik dalam populasi dasar. Populasi dengan keragaman genetik yang tinggi menyediakan peluang lebih besar untuk menemukan individu-individu yang memiliki kombinasi sifat unggul. Sebaliknya, populasi yang memiliki keragaman genetik rendah akan memberikan respons seleksi yang terbatas karena variasi genetik yang tersedia relatif sedikit.

Salah satu ancaman utama terhadap keberlanjutan variabilitas genetik adalah terjadinya *inbreeding* atau perkawinan sekerabat. *Inbreeding* menyebabkan peningkatan frekuensi individu homozigot dan penurunan heterozigositas dalam populasi. Kondisi ini meningkatkan kemungkinan munculnya alel resesif yang bersifat merugikan sehingga dapat menurunkan performa biologis populasi. Dampak negatif dari *inbreeding* dikenal sebagai *inbreeding depression*, yaitu penurunan kualitas genetik yang ditandai oleh lambatnya pertumbuhan, rendahnya tingkat kelangsungan hidup, menurunnya fertilitas, meningkatnya kerentanan terhadap penyakit, serta berkurangnya kemampuan adaptasi terhadap lingkungan. Risiko *inbreeding* umumnya lebih tinggi pada populasi budidaya yang menggunakan jumlah induk terbatas atau pada populasi liar yang mengalami penurunan ukuran populasi secara drastis.

Selain *inbreeding*, penurunan variabilitas genetik juga dapat terjadi akibat *genetic drift* atau hanyutan genetik. *Genetic drift* merupakan perubahan frekuensi alel yang terjadi secara acak dari satu generasi ke generasi berikutnya. Fenomena ini lebih sering terjadi pada populasi yang berukuran kecil karena pengaruh faktor kebetulan menjadi lebih besar dibandingkan pengaruh seleksi alam. Dalam kondisi tertentu, alel yang sebenarnya bermanfaat dapat hilang dari populasi hanya karena individu pembawanya gagal bereproduksi. Kehilangan alel secara bertahap akan menyebabkan berkurangnya keragaman genetik dan menurunkan kemampuan adaptasi populasi. Penurunan ukuran populasi yang ekstrem atau *population bottleneck* juga dapat mempercepat hilangnya variasi genetik karena hanya sebagian kecil individu yang berkontribusi terhadap generasi berikutnya.

Konsep variabilitas genetik juga memiliki hubungan erat dengan upaya konservasi sumber daya ikan. Dalam program konservasi, tujuan utama tidak hanya mempertahankan jumlah individu suatu spesies, tetapi juga menjaga keragaman genetik yang dimilikinya. Populasi yang secara jumlah tampak besar belum tentu memiliki keragaman genetik yang memadai. Oleh karena itu, berbagai program konservasi seperti penangkaran, pelepasliaran, *restocking*, dan pengelolaan stok ikan harus mempertimbangkan aspek genetika populasi. Pengelolaan yang tidak tepat dapat menyebabkan hilangnya karakter genetik lokal, terjadinya pencampuran genetik yang tidak diinginkan, atau bahkan penurunan kualitas genetik populasi sasaran. Analisis struktur genetik populasi menjadi langkah penting dalam merancang strategi konservasi yang efektif dan berkelanjutan.

## 2. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Variabilitas Genetik

Variabilitas genetik dalam populasi ikan dipengaruhi oleh berbagai faktor biologis maupun manajemen budidaya. Salah satu faktor utama adalah mutasi, yaitu perubahan materi genetik yang menghasilkan alel baru dalam populasi. Mutasi menjadi sumber awal munculnya variasi genetik yang kemudian dapat diwariskan kepada generasi berikutnya. Selain mutasi, rekombinasi genetik selama proses reproduksi seksual juga berperan penting dalam menciptakan kombinasi gen baru. Proses *crossing over* saat *meiosis* memungkinkan pertukaran segmen DNA antar kromosom homolog sehingga menghasilkan keturunan dengan susunan genetik yang berbeda dari induknya.

Faktor lain yang sangat memengaruhi adalah *genetic drift*, yaitu perubahan frekuensi alel secara acak akibat ukuran populasi yang kecil. Pada populasi budidaya dengan jumlah induk terbatas, *genetic drift* dapat menyebabkan hilangnya alel tertentu secara permanen. Kondisi ini sering terjadi pada *hatchery* yang menggunakan sedikit induk untuk produksi benih massal. Migrasi dan introduksi populasi juga dapat memengaruhi variasi genetik. Persilangan antara populasi berbeda dapat meningkatkan heterozigositas dan memperluas keragaman genetik. Sebaliknya, isolasi populasi dalam waktu lama dapat menyebabkan diferensiasi genetik yang tinggi antar populasi ikan.

Dalam sistem budidaya modern, praktik seleksi intensif juga menjadi faktor penting. Seleksi yang terlalu fokus pada satu sifat unggul tanpa mempertimbangkan keragaman genetik dapat mempercepat peningkatan inbreeding. Oleh karena itu, keseimbangan antara seleksi dan konservasi genetik menjadi prinsip penting dalam pengelolaan populasi ikan budidaya.

## 3. Metode Analisis Variabilitas Genetik

Pengukuran variabilitas genetik dapat dilakukan menggunakan berbagai pendekatan molekuler. Salah satu metode yang telah lama digunakan adalah analisis *microsatellite* atau *Simple Sequence Repeats* (SSR). *Marker microsatellite* memiliki tingkat polimorfisme tinggi sehingga sangat efektif untuk mengukur heterozigositas, kekayaan alel (*allelic richness*), dan hubungan kekerabatan antar populasi ikan. Analisis *microsatellite* juga digunakan untuk menghitung diferensiasi genetik antar populasi melalui parameter seperti FST. Nilai FST menunjukkan tingkat perbedaan genetik antar populasi, di mana semakin tinggi nilai FST maka semakin besar diferensiasi genetik yang terjadi. Informasi ini sangat penting dalam konservasi dan pengelolaan plasma nutfah ikan.

Perkembangan teknologi genomik kemudian melahirkan pendekatan berbasis *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP). Teknologi SNP memungkinkan analisis ribuan hingga jutaan titik polimorfisme DNA secara simultan dengan tingkat resolusi yang jauh lebih tinggi dibandingkan *microsatellite*. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih detail mengenai struktur populasi, pola seleksi, dan hubungan evolusi antar populasi ikan.

Selain lebih akurat, analisis SNP juga mendukung pengembangan *genomic selection* dalam program pemuliaan modern. Dengan informasi genomik yang sangat besar, peneliti dapat mengidentifikasi alel-alel penting yang berkaitan dengan sifat ekonomis seperti pertumbuhan, efisiensi pakan, dan ketahanan penyakit. Kemajuan metode analisis molekuler ini telah mengubah pendekatan pemuliaan ikan dari sistem konvensional berbasis fenotip menuju pendekatan berbasis genom yang lebih presisi dan ilmiah.

## 4. Parameter Statistik dalam Genetika Populasi

Dalam analisis variabilitas genetik, terdapat beberapa parameter statistik penting yang digunakan untuk menggambarkan kondisi genetik suatu populasi ikan. Salah satu parameter utama adalah heterozigositas harapan (He), yaitu probabilitas dua alel yang dipilih secara acak dalam populasi bersifat berbeda. Nilai He yang tinggi menunjukkan tingkat keragaman genetik yang baik. Parameter berikutnya adalah heterozigositas terobservasi (Ho), yaitu proporsi individu heterozigot yang benar-benar ditemukan dalam populasi. Perbandingan antara He dan Ho dapat digunakan untuk mendeteksi adanya inbreeding atau penyimpangan keseimbangan genetik.

Koefisien inbreeding (F) digunakan untuk mengukur tingkat perkawinan sekerabat dalam populasi. Nilai F yang tinggi menunjukkan meningkatnya homozigositas akibat inbreeding. Kondisi ini dapat berdampak negatif terhadap performa biologis ikan, seperti penurunan pertumbuhan, fertilitas, dan ketahanan penyakit. Indeks fiksasi (FST) digunakan untuk mengukur diferensiasi genetik antar populasi. Nilai FST rendah menunjukkan populasi masih memiliki hubungan genetik yang dekat, sedangkan nilai tinggi menunjukkan populasi telah mengalami isolasi genetik yang signifikan.

Parameter lain yang sering digunakan adalah jarak genetik Nei, yaitu ukuran statistik untuk menggambarkan hubungan evolusi antar populasi. Selain itu, *effective population size* (Ne) menjadi parameter penting untuk memperkirakan jumlah individu yang secara efektif berkontribusi terhadap generasi berikutnya. Pemahaman terhadap parameter-parameter ini sangat penting dalam perencanaan program pemuliaan ikan karena membantu memastikan bahwa populasi dasar memiliki keragaman genetik yang cukup untuk mendukung seleksi jangka panjang.Top of Form

## D. Haritabilitas dan Seleksi Genetik

Heritabilitas ($h^2$) adalah salah satu parameter terpenting dalam genetika kuantitatif yang menggambarkan proporsi variasi fenotipik suatu sifat yang disebabkan oleh variasi genetik aditif. Heritabilitas dalam arti sempit (*narrow-sense heritability*, $h^2$) didefinisikan sebagai rasio antara variansi genetik aditif (VA) terhadap total variansi fenotipik (VP): $h^2 = VA/VP$.

Nilai heritabilitas berkisar antara 0 hingga 1. Sifat dengan $h^2$ tinggi (> 0,4) akan memberikan respons yang baik terhadap seleksi individu, sedangkan sifat dengan $h^2$ rendah (< 0,2) lebih cocok ditangani melalui seleksi keluarga atau pendekatan genomik. Dalam praktik akuakultur, estimasi $h^2$ umumnya dilakukan menggunakan analisis pedigree atau informasi genomik melalui metode REML (*Restricted Maximum Likelihood*) (Lynch & Walsh, 1998; Meyer, 2007).

Tabel 4. Estimasi Heritabilitas Berbagai Sifat Produksi Pada Ikan Budidaya Komersial.

| Sifat | Spesies | Estimasi $h^2$ | Sumber |
|---|---|---|---|
| Bobot badan (harvest) | Nila (O. niloticus) | 0,18 – 0,35 | Ponzoni *et al*. (2016) |
| Laju pertumbuhan spesifik | Salmon Atlantik (S. salar) | 0,25 – 0,45 | Ødegård *et al*. (2014) |
| *Feed Conversion Ratio* | Lele (Clarias sp.) | 0,12 – 0,28 | Nguyen (2016) |
| Ketahanan terhadap ISA | Salmon Atlantik | 0,10 – 0,20 | Gjedrem (2012) |
| Ketahanan terhadap KHV | Ikan mas (C. carpio) | 0,15 – 0,30 | Palaiokostas *et al*. (2016) |
| Kandungan lemak fillet | Salmon Atlantik | 0,40 – 0,60 | Vallejo *et al*. (2017) |

| Sifat | Spesies | Estimasi $h^2$ | Sumber |
|---|---|---|---|
| Umur matang gonad | Nila (O. niloticus) | 0,20 – 0,40 | Ponzoni *et al*. (2016) |

Perbedaan nilai heritabilitas antar sifat menunjukkan bahwa tidak semua karakter produksi memiliki tingkat respons seleksi yang sama. Sifat dengan heritabilitas tinggi umumnya lebih mudah ditingkatkan melalui seleksi konvensional karena pengaruh genetiknya dominan. Sebaliknya, sifat dengan heritabilitas rendah membutuhkan pendekatan yang lebih kompleks, seperti seleksi berbasis keluarga, penggunaan marker molekuler, dan *genomic selection*. Informasi heritabilitas menjadi dasar penting dalam menentukan strategi pemuliaan yang paling efektif untuk setiap spesies dan karakter produksi dalam akuakultur modern.

## 1. Konsep Dasar Heritabilitas dalam Genetika Kuantitatif

Heritabilitas merupakan salah satu parameter paling penting dalam genetika kuantitatif karena menggambarkan seberapa besar pengaruh faktor genetik terhadap variasi suatu sifat dalam populasi. Dalam pemuliaan ikan, heritabilitas digunakan untuk memperkirakan potensi keberhasilan seleksi terhadap karakter produksi tertentu, seperti pertumbuhan, efisiensi pakan, kualitas daging, dan ketahanan penyakit. Secara umum, fenotip organisme merupakan hasil kombinasi antara faktor genetik dan faktor lingkungan. Oleh karena itu, variasi fenotipik yang terlihat pada populasi tidak seluruhnya disebabkan oleh faktor genetik. Heritabilitas dalam arti sempit atau *narrow-sense heritability* ($h^2$) didefinisikan sebagai rasio antara variansi genetik aditif (VA) dengan total variansi fenotipik (VP), yang dirumuskan sebagai $h^2 = VA/VP$.

Nilai heritabilitas berkisar antara 0 hingga 1. Nilai yang mendekati 1 menunjukkan bahwa faktor genetik memiliki pengaruh dominan terhadap suatu sifat, sedangkan nilai yang mendekati 0 menunjukkan bahwa faktor lingkungan lebih berperan dalam menentukan ekspresi sifat tersebut. Dalam praktik akuakultur, pemahaman terhadap heritabilitas sangat penting karena menentukan

strategi seleksi yang paling efektif untuk meningkatkan performa populasi budidaya. Sifat dengan heritabilitas tinggi umumnya memberikan *response to selection* yang cepat karena sebagian besar variasinya diwariskan secara genetik. Sebaliknya, sifat dengan heritabilitas rendah membutuhkan pendekatan pemuliaan yang lebih kompleks karena pengaruh lingkungan sangat besar terhadap ekspresi fenotipiknya.

## 2. Metode Estimasi Heritabilitas pada Ikan Budidaya

Estimasi heritabilitas merupakan langkah penting dalam program pemuliaan ikan karena memberikan informasi mengenai besarnya kontribusi faktor genetik terhadap variasi fenotipik suatu sifat dalam populasi. Melalui estimasi heritabilitas, pemulia dapat menentukan efektivitas seleksi yang dilakukan untuk meningkatkan karakter-karakter ekonomis penting, seperti laju pertumbuhan, efisiensi pemanfaatan pakan, ketahanan terhadap penyakit, tingkat kelangsungan hidup, kualitas daging, serta performa reproduksi. Semakin akurat nilai heritabilitas yang diperoleh, semakin tepat pula strategi seleksi yang dapat diterapkan dalam program pemuliaan. Oleh karena itu, berbagai metode statistik dan molekuler telah dikembangkan untuk mengestimasi heritabilitas pada populasi ikan budidaya.

Salah satu metode yang paling lama dan banyak digunakan adalah analisis *pedigree* atau analisis silsilah. Metode ini memanfaatkan informasi hubungan kekerabatan antarindividu dalam suatu populasi untuk memperkirakan proporsi variasi fenotipik yang disebabkan oleh faktor genetik. Dalam pendekatan ini, individu-individu yang memiliki hubungan keluarga, seperti induk dan keturunannya atau kelompok saudara kandung (*full-sib* dan *half-sib*), diamati dan dibandingkan performanya. Kesamaan fenotip yang ditemukan pada individu-individu yang berkerabat diasumsikan sebagian berasal dari kesamaan genetik yang mereka warisi dari leluhurnya. Dengan menggunakan data silsilah yang lengkap, peneliti dapat memisahkan komponen variasi yang berasal dari faktor genetik dan faktor lingkungan sehingga diperoleh estimasi heritabilitas yang relatif akurat.

Pada awal perkembangan genetika kuantitatif, estimasi heritabilitas sering dilakukan melalui analisis korelasi antara induk dan keturunan (*parent-offspring regression*) atau melalui analisis variansi pada kelompok keluarga. Metode ini relatif sederhana, tetapi memiliki

keterbatasan karena kurang mampu mengakomodasi struktur populasi yang kompleks serta pengaruh lingkungan yang beragam. Seiring berkembangnya teknologi komputasi dan metode statistik, pendekatan yang lebih canggih mulai digunakan untuk meningkatkan akurasi estimasi parameter genetik.

Salah satu metode yang saat ini dianggap sebagai standar dalam genetika kuantitatif adalah *Restricted Maximum Likelihood* (*REML*). Metode *REML* digunakan untuk mengestimasi komponen variansi genetik dan lingkungan melalui penerapan *mixed linear model*. Dalam model ini, faktor-faktor genetik diperlakukan sebagai efek acak (*random effects*), sedangkan faktor-faktor tertentu seperti perlakuan atau kelompok pemeliharaan dapat diperlakukan sebagai efek tetap (*fixed effects*). Keunggulan utama metode *REML* adalah kemampuannya menghasilkan estimasi yang tidak bias meskipun data yang digunakan tidak seimbang atau memiliki ukuran sampel yang berbeda antar kelompok.

Metode *REML* memungkinkan pemisahan variansi fenotipik menjadi beberapa komponen, termasuk variansi genetik aditif, variansi lingkungan, dan terkadang variansi yang berasal dari interaksi antara genotipe dan lingkungan. Dengan demikian, estimasi heritabilitas yang dihasilkan menjadi lebih akurat dibandingkan metode konvensional. Selain itu, *REML* mampu memanfaatkan informasi hubungan kekerabatan seluruh individu dalam populasi secara simultan sehingga sangat sesuai untuk diterapkan pada program pemuliaan ikan yang melibatkan banyak keluarga dan beberapa generasi.

Perkembangan teknologi genomik telah membawa perubahan besar dalam metode estimasi heritabilitas. Jika pendekatan tradisional sangat bergantung pada data *pedigree*, maka pendekatan genomik memungkinkan hubungan genetik antarindividu diukur secara langsung menggunakan informasi *DNA*. Salah satu teknologi yang paling banyak digunakan adalah penanda molekuler *Single Nucleotide Polymorphism* (*SNP*). *SNP* merupakan variasi satu basa nukleotida pada posisi tertentu dalam genom yang dapat digunakan sebagai penanda untuk mengidentifikasi perbedaan genetik antarindividu.

Melalui analisis ribuan hingga jutaan *SNP* yang tersebar di seluruh genom, peneliti dapat membangun matriks hubungan genomik atau *genomic relationship matrix* (*GRM*). Matriks ini menggambarkan tingkat kemiripan genetik aktual antarindividu berdasarkan data genom,

bukan hanya berdasarkan hubungan keluarga yang tercatat dalam silsilah. Pendekatan ini sangat bermanfaat pada populasi budidaya yang memiliki data *pedigree* tidak lengkap, tidak akurat, atau bahkan tidak tersedia sama sekali. Dengan menggunakan informasi genomik, estimasi heritabilitas dapat dilakukan secara lebih objektif dan mencerminkan hubungan genetik yang sebenarnya.

Metode estimasi berbasis genomik juga memberikan keuntungan dalam mendeteksi variasi genetik yang tidak dapat diamati melalui analisis silsilah konvensional. Dalam banyak kasus, individu yang secara teoritis memiliki hubungan kekerabatan yang sama ternyata menunjukkan tingkat kemiripan genetik yang berbeda akibat proses rekombinasi selama pembentukan gamet. Data genomik mampu menangkap variasi tersebut sehingga menghasilkan estimasi parameter genetik yang lebih presisi.

Saat ini, banyak program pemuliaan ikan modern mengintegrasikan data fenotipik dan data genomik melalui pendekatan yang dikenal sebagai *genomic selection*. Dalam pendekatan ini, informasi fenotip individu dikombinasikan dengan ribuan penanda *SNP* untuk memprediksi nilai pemuliaan atau *genomic breeding value*. Metode ini memungkinkan seleksi dilakukan pada usia yang lebih dini dan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan seleksi konvensional. Akibatnya, kemajuan genetik dapat dicapai lebih cepat dan efisien.

Penerapan metode estimasi heritabilitas berbasis genomik telah banyak dilakukan pada berbagai spesies ikan budidaya penting, seperti salmon, nila, ikan mas, lele, dan trout. Karakter-karakter ekonomis yang sering dianalisis meliputi pertumbuhan, efisiensi pakan, resistensi terhadap penyakit, kualitas fillet, dan toleransi terhadap stres lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pendekatan genomik mampu meningkatkan akurasi estimasi heritabilitas serta efektivitas program seleksi dibandingkan metode yang hanya mengandalkan data *pedigree*.

Metode estimasi heritabilitas pada ikan budidaya telah berkembang dari pendekatan berbasis silsilah menuju pendekatan berbasis genomik yang lebih canggih. Analisis *pedigree* dan metode *REML* masih menjadi fondasi utama dalam genetika kuantitatif, sedangkan penggunaan penanda *SNP*, *genomic relationship matrix*, dan *genomic selection* memberikan tingkat presisi yang lebih tinggi dalam

mengukur kontribusi faktor genetik terhadap variasi fenotipik. Perkembangan ini memungkinkan program pemuliaan ikan dilaksanakan secara lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk menghasilkan strain unggul yang memiliki produktivitas tinggi dan mampu memenuhi kebutuhan industri akuakultur modern.

## E. Market Genetik dalam Budidaya

Marker genetik adalah urutan DNA yang lokasinya diketahui dalam genom dan dapat diidentifikasi melalui prosedur laboratorium yang baku. Marker genetik berfungsi sebagai penanda yang dapat diasosiasikan dengan sifat-sifat tertentu (*quantitative trait loci*/QTL) atau digunakan untuk tujuan identifikasi individu, verifikasi *pedigree*, dan analisis keragaman populasi (Liu & Cordes, 2004).

Berbagai jenis marker genetik telah dikembangkan dan diaplikasikan dalam akuakultur, masing-masing dengan karakteristik dan keunggulannya tersendiri. *Microsatellite* atau *Simple Sequence Repeat* (SSR) merupakan marker yang mengandung pengulangan motif pendek (2-6 bp) yang sangat polimorfik dan dapat dideteksi dengan mudah menggunakan PCR. SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) merupakan variasi nukleotida tunggal yang tersebar sangat melimpah di seluruh genom dan telah menjadi marker pilihan di era genomik modern karena kemudahan genotipingnya dalam skala besar menggunakan chip SNP atau sekuensing (Helyar *et al*., 2011).

Aplikasi terkini dari marker genetik dalam akuakultur mencakup *parentage assignment* (untuk program seleksi keluarga tanpa perlu pemeliharaan terpisah), *genetic tagging* (sebagai alternatif tag fisik), identifikasi spesies dan strain dalam rantai produksi, serta deteksi dini individu yang membawa alel resistensi terhadap penyakit. Teknologi *genotyping-by-sequencing* (GBS) dan *restriction-site-associated* DNA *sequencing* (RAD-seq) telah mempermurah biaya genotip SNP secara dramatis, membuat aplikasi ini semakin aksesibel bahkan untuk spesies akuakultur minor (Davey *et al*., 2011).

### 1. Konsep Dasar *Marker* Genetik

*Marker* genetik merupakan urutan *DNA* yang memiliki lokasi spesifik pada genom dan dapat diidentifikasi menggunakan berbagai teknik biologi molekuler. *Marker* ini berfungsi sebagai penanda biologis

yang memungkinkan peneliti mendeteksi variasi genetik antarindividu, antarpopulasi, maupun antargenerasi dalam suatu spesies. Dalam bidang genetika dan akuakultur, *marker* genetik menjadi alat yang sangat penting karena mampu memberikan informasi mengenai struktur genetik, hubungan kekerabatan, serta pewarisan sifat-sifat tertentu yang bernilai ekonomis. Berbeda dengan pengamatan fenotipik yang sering dipengaruhi oleh faktor lingkungan, penggunaan *marker* genetik memungkinkan identifikasi karakter unggul dilakukan secara lebih objektif, cepat, dan akurat karena didasarkan langsung pada informasi genetik yang terdapat dalam genom organisme.

Secara konseptual, *marker* genetik merupakan variasi yang dapat diamati pada urutan *DNA* dan diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Variasi tersebut dapat berupa perubahan satu nukleotida, perbedaan panjang fragmen *DNA*, pengulangan urutan basa tertentu, maupun variasi struktur kromosom. Suatu *marker* genetik yang baik harus memiliki tingkat polimorfisme yang tinggi, mudah dideteksi, stabil antar generasi, serta mampu memberikan informasi yang jelas mengenai perbedaan genetik antarindividu. Oleh karena itu, berbagai jenis *marker* molekuler telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan penelitian genetika, pemuliaan, dan konservasi sumber daya perikanan.

Pada dasarnya, *marker* genetik tidak selalu merupakan gen yang secara langsung mengendalikan ekspresi suatu sifat. Sebagian besar *marker* hanya berfungsi sebagai penanda lokasi tertentu dalam genom. Namun, apabila suatu *marker* berada sangat dekat dengan gen yang mengontrol suatu karakter, maka keduanya cenderung diwariskan bersama karena peluang terjadinya rekombinasi di antara keduanya relatif kecil. Fenomena ini dikenal sebagai *genetic linkage* atau keterpautan genetik. Karena alasan tersebut, *marker* genetik dapat digunakan untuk melacak keberadaan gen atau kelompok gen yang berhubungan dengan karakter tertentu tanpa harus mengidentifikasi gen tersebut secara langsung.

Salah satu aplikasi utama *marker* genetik dalam pemuliaan ikan adalah identifikasi *Quantitative Trait Loci* (*QTL*). *QTL* merupakan wilayah tertentu pada genom yang berkontribusi terhadap variasi sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen dan dipengaruhi oleh lingkungan. Karakter-karakter penting dalam akuakultur, seperti pertumbuhan, efisiensi pemanfaatan pakan, kualitas daging, toleransi terhadap stres lingkungan, umur matang gonad, dan ketahanan terhadap

penyakit umumnya termasuk ke dalam sifat kuantitatif. Melalui analisis keterkaitan antara *marker* genetik dan *QTL*, peneliti dapat mengidentifikasi wilayah genom yang berperan dalam mengendalikan sifat-sifat tersebut sehingga proses seleksi dapat dilakukan secara lebih efektif.

Penggunaan *marker* genetik telah mendorong berkembangnya pendekatan *Marker-Assisted Selection* (*MAS*), yaitu metode seleksi yang memanfaatkan informasi molekuler untuk memilih individu unggul. Dalam pendekatan ini, pemilihan calon induk tidak hanya didasarkan pada performa fenotipik, tetapi juga pada keberadaan *marker* yang terkait dengan sifat yang diinginkan. Keunggulan metode ini adalah seleksi dapat dilakukan pada usia yang lebih muda dan tidak harus menunggu sifat tersebut muncul secara fenotipik. Dengan demikian, efisiensi program pemuliaan dapat meningkat dan waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan strain unggul menjadi lebih singkat.

Selain digunakan untuk identifikasi sifat unggul, *marker* genetik juga memiliki berbagai aplikasi penting dalam genetika populasi. Salah satunya adalah analisis hubungan kekerabatan antarindividu. Melalui informasi genetik yang diperoleh dari *marker*, tingkat kemiripan genetik antarindividu dapat dihitung secara akurat. Informasi ini sangat berguna dalam pengelolaan program pemuliaan untuk menghindari terjadinya *inbreeding* atau perkawinan sekerabat yang dapat menurunkan kualitas genetik populasi. Selain itu, *marker* genetik juga digunakan untuk verifikasi *pedigree* atau silsilah, sehingga asal-usul individu dalam suatu populasi budidaya dapat dipastikan dengan tingkat akurasi yang tinggi.

Dalam bidang konservasi sumber daya ikan, *marker* genetik berperan penting dalam identifikasi spesies, analisis struktur populasi, serta evaluasi keragaman genetik. Informasi ini diperlukan untuk memahami hubungan evolusioner antar populasi, mengidentifikasi populasi yang terisolasi, dan merancang strategi konservasi yang tepat. Analisis keragaman genetik menggunakan *marker* molekuler juga membantu menentukan tingkat kesehatan genetik suatu populasi dan memperkirakan kemampuannya untuk beradaptasi terhadap perubahan lingkungan di masa depan.

Perkembangan teknologi biologi molekuler telah menghasilkan berbagai jenis *marker* genetik yang digunakan dalam penelitian perikanan. Beberapa di antaranya adalah *Restriction Fragment Length Polymorphism* (*RFLP*), *Random Amplified Polymorphic DNA* (*RAPD*),

*Amplified Fragment Length Polymorphism* (*AFLP*), *microsatellite* atau *Simple Sequence Repeat* (*SSR*), serta *Single Nucleotide Polymorphism* (*SNP*). Di antara berbagai jenis *marker* tersebut, *SNP* saat ini menjadi salah satu yang paling banyak digunakan karena jumlahnya sangat melimpah di seluruh genom, memiliki stabilitas tinggi, dan dapat dianalisis menggunakan teknologi berkapasitas besar.

Kemajuan teknologi genomik dan *Next Generation Sequencing* (*NGS*) telah membawa perubahan besar dalam pemanfaatan *marker* genetik. Jika pada masa lalu analisis hanya dilakukan terhadap beberapa *marker*, kini jutaan *marker* dapat dianalisis secara simultan dalam satu penelitian. Kemampuan ini memungkinkan pemetaan genom secara lebih rinci, identifikasi *QTL* yang lebih akurat, serta pengembangan metode *genomic selection* yang memanfaatkan informasi dari seluruh genom untuk memprediksi nilai genetik individu.

Dalam akuakultur modern, penggunaan *marker* genetik telah mengubah paradigma pemuliaan dari pendekatan berbasis fenotip menuju pendekatan berbasis genom. Pendekatan berbasis genom memungkinkan seleksi dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi karena informasi yang digunakan berasal langsung dari variasi genetik yang mendasari suatu karakter. Akibatnya, program pemuliaan dapat menghasilkan kemajuan genetik yang lebih cepat, meningkatkan produktivitas budidaya, dan mendukung pengembangan strain ikan unggul yang memiliki pertumbuhan cepat, efisiensi pakan tinggi, kualitas produk yang baik, serta ketahanan yang lebih kuat terhadap penyakit dan perubahan lingkungan.

## 2. Jenis-Jenis *Marker* Genetik pada Ikan

Berbagai jenis *marker* genetik telah dikembangkan dan diaplikasikan dalam penelitian maupun program pemuliaan ikan budidaya. Salah satu *marker* yang paling awal banyak digunakan adalah *microsatellite* atau *Simple Sequence Repeat* (SSR). *Marker microsatellite* terdiri atas pengulangan motif DNA pendek sepanjang 2–6 pasangan basa yang tersebar di berbagai bagian genom. *Microsatellite* memiliki tingkat polimorfisme yang sangat tinggi sehingga efektif digunakan untuk analisis keragaman genetik, hubungan kekerabatan, dan identifikasi populasi. Deteksi *marker* ini umumnya dilakukan menggunakan teknik *Polymerase Chain Reaction* (PCR), sehingga relatif mudah diaplikasikan di laboratorium genetika molekuler.

Selain *microsatellite, marker* yang kini paling banyak digunakan adalah *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP). SNP merupakan variasi satu basa nukleotida pada posisi tertentu dalam genom. *Marker* SNP tersebar sangat melimpah di seluruh genom ikan sehingga memberikan resolusi analisis yang jauh lebih tinggi dibandingkan *microsatellite*. Keunggulan utama SNP adalah kemampuannya untuk dianalisis secara massal menggunakan chip SNP maupun teknologi sekuensing modern. Dengan ribuan hingga jutaan SNP yang dapat dianalisis secara simultan, marker ini menjadi fondasi utama dalam *genomic selection* dan studi genomik skala besar pada akuakultur modern.

Selain SSR dan SNP, terdapat pula marker lain seperti *Restriction Fragment Length Polymorphism* (RFLP), *Amplified Fragment Length Polymorphism* (AFLP), dan *Random Amplified Polymorphic* DNA (RAPD). Namun, perkembangan teknologi genomik menyebabkan penggunaan marker tersebut mulai berkurang karena resolusi dan efisiensinya lebih rendah dibandingkan SNP.

### 3. Aplikasi Marker Genetik dalam Program Pemuliaan

Perkembangan genetika molekuler dan teknologi genomik telah menjadikan *marker* genetik sebagai salah satu alat utama dalam program pemuliaan ikan modern. Penggunaan *marker* genetik memungkinkan proses seleksi dilakukan secara lebih akurat karena didasarkan pada informasi genetik yang mendasari suatu karakter, bukan hanya pada penampilan fenotipik yang sering dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Dengan memanfaatkan variasi pada tingkat *DNA*, pemulia dapat mengidentifikasi individu unggul sejak usia dini, mempercepat kemajuan genetik, serta meningkatkan efisiensi program pemuliaan. Oleh karena itu, aplikasi *marker* genetik dalam akuakultur semakin luas dan menjadi bagian penting dalam pengembangan strain ikan yang produktif, tahan penyakit, dan memiliki nilai ekonomis tinggi.

Salah satu aplikasi yang paling banyak digunakan adalah *Marker-Assisted Selection* (*MAS*). *MAS* merupakan metode seleksi yang memanfaatkan *marker DNA* yang memiliki keterkaitan dengan gen atau *Quantitative Trait Loci* (*QTL*) yang mengendalikan sifat-sifat unggul tertentu. Dalam pendekatan ini, individu dipilih berdasarkan keberadaan alel atau *marker* yang diinginkan tanpa harus menunggu karakter tersebut muncul secara fenotipik. Keunggulan utama *MAS* adalah kemampuannya mempercepat proses seleksi karena evaluasi dapat

dilakukan sejak fase larva atau benih. Metode ini sangat bermanfaat untuk karakter yang memiliki heritabilitas rendah, sulit diukur, mahal untuk diamati, atau baru muncul pada fase kehidupan tertentu.

Penerapan *MAS* sangat penting dalam seleksi sifat-sifat ekonomis yang sulit diamati secara langsung. Sebagai contoh, ketahanan terhadap penyakit umumnya hanya dapat dievaluasi melalui uji tantang yang berisiko menyebabkan kematian ikan. Dengan menggunakan *marker* genetik yang terkait dengan gen resistensi, individu yang memiliki potensi ketahanan tinggi dapat diidentifikasi tanpa perlu melakukan pengujian penyakit secara langsung. Demikian pula pada karakter kualitas daging, komposisi lemak, atau efisiensi penggunaan pakan yang memerlukan pengukuran kompleks dan mahal. Melalui *MAS*, seleksi dapat dilakukan dengan lebih cepat, aman, dan efisien.

Aplikasi penting lainnya adalah *parentage assignment*, yaitu identifikasi hubungan induk dan keturunan menggunakan informasi genetik. Dalam program pemuliaan konvensional, setiap keluarga sering kali harus dipelihara secara terpisah untuk menjaga identitas keturunannya. Metode ini memerlukan banyak wadah pemeliharaan, tenaga kerja, dan biaya operasional. Dengan teknologi *parentage assignment*, seluruh keluarga dapat dipelihara bersama dalam satu lingkungan yang sama, kemudian hubungan kekerabatan ditentukan melalui analisis *DNA* menggunakan *marker* molekuler. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan populasi yang lebih efisien sekaligus meningkatkan akurasi pencatatan silsilah atau *pedigree*.

Pemanfaatan *parentage assignment* juga memberikan keuntungan dalam pengendalian *inbreeding* atau perkawinan sekerabat. Dengan mengetahui hubungan genetik antarindividu secara tepat, pemulia dapat merancang strategi perkawinan yang mampu mempertahankan keragaman genetik populasi sekaligus meminimalkan risiko munculnya *inbreeding depression*. Oleh karena itu, teknologi ini menjadi komponen penting dalam program pemuliaan jangka panjang yang berkelanjutan.

Selain untuk identifikasi kekerabatan, *marker* genetik juga digunakan sebagai *genetic tagging* atau penandaan genetik. *Genetic tagging* merupakan metode identifikasi individu, keluarga, atau strain berdasarkan profil genetik unik yang dimiliki setiap organisme. Berbeda dengan penandaan fisik menggunakan *tag* eksternal, seperti *microchip*, cincin, atau penanda plastik, identitas genetik bersifat permanen dan

tidak dapat hilang akibat pertumbuhan, kerusakan, atau faktor lingkungan. Karena itu, *genetic tagging* menjadi solusi yang sangat efektif untuk pelacakan individu dalam program pemuliaan maupun penelitian genetika populasi.

Dalam industri akuakultur modern, *genetic tagging* juga berperan penting dalam menjaga kemurnian strain unggul. Banyak strain hasil pemuliaan memiliki nilai ekonomi yang tinggi sehingga perlu dilindungi dari pencampuran genetik yang tidak diinginkan. Dengan menggunakan profil *DNA* sebagai identitas biologis, kemurnian strain dapat diverifikasi secara akurat pada setiap generasi. Teknologi ini juga membantu lembaga penelitian dan perusahaan pembenihan dalam melindungi hak kepemilikan sumber daya genetik yang telah dikembangkan.

Aplikasi lain yang sangat penting adalah identifikasi spesies dan strain ikan. Dalam praktik budidaya dan perdagangan perikanan, sering ditemukan spesies atau strain yang memiliki kemiripan morfologi sehingga sulit dibedakan secara visual. Analisis menggunakan *marker* genetik memungkinkan identifikasi dilakukan dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Teknologi ini sangat bermanfaat untuk memastikan keaslian produk, mencegah kesalahan identifikasi spesies, serta menjaga kualitas benih yang digunakan dalam kegiatan budidaya.

Identifikasi berbasis *DNA* juga mendukung sistem *traceability* dalam rantai produksi perikanan. *Traceability* merupakan kemampuan untuk menelusuri asal-usul suatu produk mulai dari tahap pembenihan, pembesaran, hingga distribusi kepada konsumen. Dalam industri perikanan global yang semakin menuntut transparansi dan keamanan pangan, sistem *traceability* menjadi kebutuhan penting untuk menjamin mutu produk dan meningkatkan kepercayaan konsumen. Dengan bantuan *marker* genetik, asal-usul ikan dapat diverifikasi secara ilmiah sehingga risiko pemalsuan produk dapat diminimalkan.

Salah satu aplikasi yang berkembang sangat pesat saat ini adalah deteksi dini individu pembawa alel resistensi penyakit. Penyakit merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan kerugian ekonomi dalam industri akuakultur. Wabah penyakit dapat menurunkan tingkat kelangsungan hidup, menghambat pertumbuhan, dan meningkatkan biaya produksi akibat penggunaan obat-obatan maupun tindakan pengendalian lainnya. Dengan menggunakan *marker* genetik yang berasosiasi dengan gen ketahanan penyakit, individu yang memiliki potensi resistensi tinggi dapat diidentifikasi sejak tahap awal kehidupan.

Pendekatan ini memungkinkan pengembangan program seleksi yang berfokus pada peningkatan ketahanan populasi terhadap patogen tertentu, seperti bakteri, virus, maupun parasit. Hasilnya adalah terbentuknya populasi ikan yang lebih sehat, lebih produktif, dan lebih mampu bertahan dalam kondisi budidaya intensif. Selain meningkatkan keuntungan ekonomi, penggunaan ikan yang secara genetik lebih tahan penyakit juga dapat mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik dan bahan kimia, sehingga mendukung praktik akuakultur yang lebih ramah lingkungan.

Seiring berkembangnya teknologi genomik, aplikasi *marker* genetik kini semakin terintegrasi dengan pendekatan *genomic selection*. Berbeda dengan *MAS* yang hanya menggunakan beberapa *marker* yang terkait dengan karakter tertentu, *genomic selection* memanfaatkan ribuan hingga jutaan *Single Nucleotide Polymorphism* (*SNP*) yang tersebar di seluruh genom. Pendekatan ini memungkinkan prediksi nilai genetik individu dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi sehingga kemajuan genetik dapat dicapai lebih cepat dibandingkan metode seleksi konvensional.

## 4. Teknologi Genotiping Modern dalam Akuakultur

Kemajuan teknologi genomik telah meningkatkan efisiensi analisis *marker* genetik secara drastis. Salah satu teknologi yang berkembang pesat adalah *Genotyping-by-Sequencing* (GBS), yaitu metode yang mengombinasikan pemotongan DNA menggunakan enzim restriksi dengan teknologi sekuensing generasi baru. GBS memungkinkan identifikasi ribuan marker SNP secara simultan dengan biaya yang relatif lebih murah dibandingkan metode genotiping konvensional. Teknologi ini sangat efektif untuk spesies ikan yang belum memiliki referensi genom lengkap karena dapat menghasilkan data genetik dalam jumlah besar dengan prosedur yang lebih sederhana.

Teknologi lain yang banyak digunakan adalah *Restriction-site Associated DNA Sequencing* (RAD-seq). Pendekatan ini memanfaatkan daerah DNA di sekitar situs restriksi tertentu untuk menghasilkan *marker* SNP dalam jumlah besar. RAD-seq sangat berguna dalam pemetaan genom, analisis populasi, dan identifikasi QTL pada spesies akuakultur. Kemajuan teknologi sekuensing generasi berikutnya (*Next Generation Sequencing*/NGS) juga menyebabkan biaya analisis genom terus menurun. Akibatnya, penggunaan marker genetik kini tidak hanya

terbatas pada spesies akuakultur utama seperti salmon dan nila, tetapi juga mulai diterapkan pada spesies minor yang sebelumnya sulit dianalisis secara genomik. Perkembangan ini membuka peluang besar bagi penerapan pemuliaan berbasis genom secara lebih luas dalam industri akuakultur global.



# BAB III
# TEKNOLOGI SELEKSI GENETIK DALAM PEMULIAAN IKAN

## A. Seleksi Massa dan Seleksi Keluarga

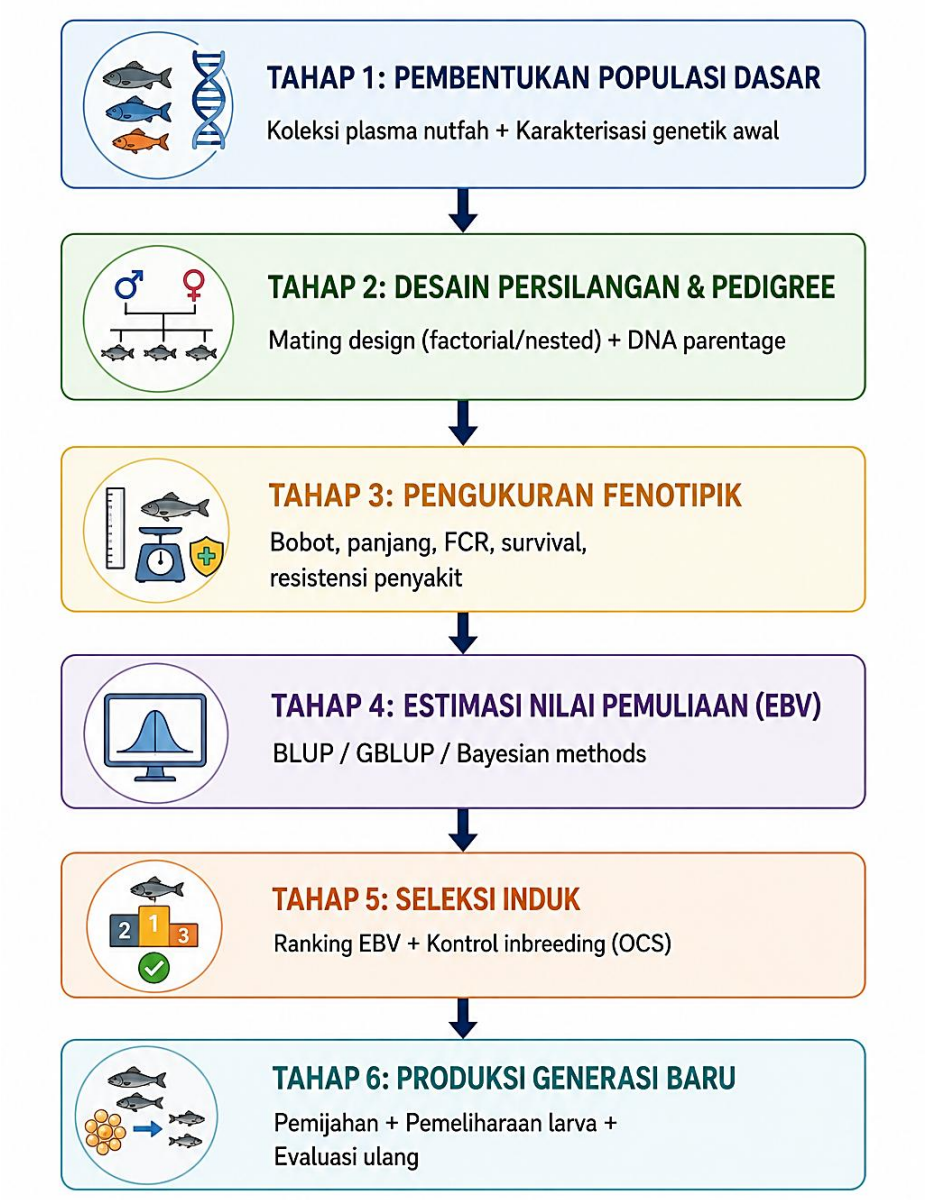
Seleksi massa merupakan bentuk paling sederhana dari seleksi artifisial, di mana individu-individu dengan nilai fenotipik tertinggi untuk sifat target dipilih sebagai induk generasi berikutnya. Meskipun sederhana dalam konsep, seleksi massa dapat memberikan respons yang bermakna untuk sifat-sifat dengan heritabilitas sedang hingga tinggi. Contoh paling terkenal adalah program GIFT (*Genetically Improved Farmed Tilapia*) yang dimulai di ICLARM (kini *WorldFish*) pada tahun 1988 dan berhasil meningkatkan laju pertumbuhan nila sebesar 85% selama 10 generasi seleksi (Eknath *et al*., 2007).

Seleksi keluarga (*family selection*) merupakan pendekatan yang lebih canggih di mana performansi seluruh keluarga *half-sib* atau *full-sib* digunakan sebagai dasar seleksi, bukan hanya performa individu. Pendekatan ini sangat efektif untuk sifat-sifat dengan heritabilitas rendah atau sifat-sifat yang hanya dapat diukur pada sebagian individu (seperti ketahanan penyakit melalui uji tantang). Seleksi keluarga membutuhkan manajemen pedigree yang ketat, yang kini difasilitasi oleh analisis marker genetik (Gjedrem *et al*., 2012).

Seleksi indeks (*index selection*) menggabungkan informasi dari berbagai sumber nilai fenotipik individu, nilai rata-rata keluarga, dan informasi pedigree untuk menghasilkan estimasi breeding value yang paling akurat secara statistik. *Best Linear Unbiased Prediction* (BLUP)

merupakan metodologi standar yang digunakan dalam konstruksi indeks seleksi modern. BLUP menggunakan matriks hubungan genetik antar individu (*relationship matrix*, A) untuk mempartisi pengaruh genetik dan lingkungan secara simultan (Henderson, 1975; Mrode, 2014).

Gambar 3. Flowchart Proses Seleksi Genetik Sistematik dalam Program Pemuliaan Ikan Modern



Gambar 3 menunjukkan tahapan sistematik dalam proses seleksi genetik pada program pemuliaan ikan modern. Setiap tahap memiliki fungsi yang saling berkaitan untuk menghasilkan populasi ikan unggul dengan performa produksi yang lebih baik, baik dari aspek pertumbuhan, efisiensi pakan, maupun ketahanan terhadap penyakit. Flowchart tersebut menggambarkan bahwa program seleksi genetik modern tidak lagi hanya mengandalkan pengamatan fenotip sederhana, tetapi telah memanfaatkan integrasi data fenotipik, pedigree, dan genomik. Pendekatan ini memungkinkan proses seleksi dilakukan secara lebih akurat, efisien, dan terkontrol sehingga mampu menghasilkan strain ikan unggul yang sesuai dengan kebutuhan industri akuakultur modern.

## 1. Konsep Dasar Seleksi Massa dalam Akuakultur

Seleksi massa merupakan metode seleksi paling sederhana dan paling awal digunakan dalam program pemuliaan ikan. Pada metode ini, individu-individu dengan performa fenotipik terbaik dipilih sebagai calon induk untuk menghasilkan generasi berikutnya. Seleksi dilakukan berdasarkan pengamatan langsung terhadap karakter target seperti bobot tubuh, panjang tubuh, warna, pertumbuhan, atau tingkat kelangsungan hidup. Prinsip utama seleksi massa adalah bahwa individu dengan fenotip unggul diasumsikan memiliki genotipe unggul yang dapat diwariskan kepada keturunannya. Oleh karena itu, semakin baik performa individu yang dipilih, semakin besar peluang peningkatan kualitas populasi pada generasi berikutnya.

Metode ini sangat efektif untuk sifat-sifat yang memiliki nilai heritabilitas sedang hingga tinggi karena pengaruh faktor genetik terhadap fenotip relatif besar. Pada sifat seperti pertumbuhan atau ukuran tubuh, seleksi massa dapat menghasilkan kemajuan genetik yang cukup signifikan meskipun tanpa dukungan teknologi molekuler yang kompleks. Salah satu contoh keberhasilan seleksi massa dalam akuakultur adalah program GIFT (*Genetically Improved Farmed Tilapia*) yang dikembangkan oleh ICLARM atau WorldFish sejak tahun 1988. Program ini berhasil meningkatkan laju pertumbuhan ikan nila hingga sekitar 85% setelah beberapa generasi seleksi. Keberhasilan tersebut menunjukkan bahwa seleksi sederhana berbasis fenotip tetap memiliki nilai strategis dalam pengembangan akuakultur modern. Namun demikian, seleksi massa juga memiliki keterbatasan. Fenotip individu tidak sepenuhnya mencerminkan kualitas genetik karena masih

dipengaruhi lingkungan. Faktor seperti kualitas air, pakan, kepadatan tebar, dan kesehatan ikan dapat memengaruhi performa fenotipik sehingga seleksi berdasarkan penampilan saja terkadang kurang akurat.

### 2. Seleksi Keluarga dan Manajemen *Pedigree*

Seleksi keluarga (*family selection*) merupakan pendekatan pemuliaan yang lebih maju dibandingkan seleksi massa. Pada metode ini, keputusan seleksi tidak hanya didasarkan pada performa individu, tetapi juga mempertimbangkan performa seluruh anggota keluarga, baik *full-sib* maupun *half-sib*. Pendekatan ini sangat efektif untuk sifat-sifat dengan heritabilitas rendah atau sifat yang sulit diukur secara langsung pada semua individu. Contohnya adalah ketahanan penyakit yang umumnya diuji melalui *challenge test*. Dalam pengujian tersebut, sebagian individu dipaparkan pada patogen untuk mengukur tingkat resistensi, sedangkan individu lain dalam keluarga yang sama dipertahankan sebagai calon induk.

Melalui seleksi keluarga, informasi genetik dapat diperoleh secara lebih akurat karena performa keluarga mencerminkan kontribusi genetik yang lebih stabil dibandingkan performa individu tunggal. Metode ini juga membantu mengurangi pengaruh lingkungan terhadap keputusan seleksi. Pelaksanaan seleksi keluarga membutuhkan sistem pencatatan pedigree yang ketat. Setiap individu harus diketahui asal-usul induknya sehingga hubungan kekerabatan antar keluarga dapat dianalisis dengan tepat. Dalam akuakultur modern, pencatatan *pedigree* tidak lagi hanya dilakukan secara manual, tetapi didukung oleh analisis DNA parentage menggunakan marker genetik.

Teknologi *parentage analysis* memungkinkan identifikasi induk biologis secara akurat meskipun larva dipelihara secara massal dalam satu wadah. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi produksi karena *hatchery* tidak perlu memelihara setiap keluarga secara terpisah. Seleksi keluarga kini menjadi metode yang banyak digunakan pada program pemuliaan ikan komersial, terutama pada spesies seperti salmon, nila, udang, dan ikan mas yang memiliki target seleksi kompleks seperti resistensi penyakit dan efisiensi pakan.

### 3. Seleksi Indeks dan Pendekatan BLUP

Perkembangan genetika kuantitatif melahirkan metode seleksi yang lebih akurat melalui penggunaan seleksi indeks (*index selection*).

Pada pendekatan ini, berbagai sumber informasi digabungkan secara simultan untuk menghasilkan estimasi nilai genetik terbaik bagi setiap individu. Informasi yang digunakan dalam seleksi indeks meliputi performa fenotipik individu, performa keluarga, hubungan *pedigree*, serta data genomik apabila tersedia. Dengan mengintegrasikan berbagai sumber data, estimasi *breeding value* menjadi lebih akurat dibandingkan hanya menggunakan pengamatan fenotipik sederhana.

Metode statistik yang paling banyak digunakan dalam seleksi indeks modern adalah *Best Linear Unbiased Prediction* (BLUP). BLUP bekerja dengan memanfaatkan *relationship matrix* atau matriks hubungan genetik antar individu untuk memisahkan pengaruh genetik dan pengaruh lingkungan secara simultan. Keunggulan utama BLUP adalah kemampuannya memperkirakan *Estimated Breeding Value* (EBV) secara objektif dan akurat meskipun data berasal dari lingkungan yang berbeda-beda. Dengan pendekatan ini, individu yang memiliki nilai genetik terbaik dapat diidentifikasi secara lebih presisi.

Perkembangan berikutnya melahirkan *Genomic* BLUP (GBLUP), yaitu pengembangan metode BLUP dengan memasukkan informasi marker genomik seperti SNP. Penggunaan data genomik meningkatkan akurasi prediksi terutama untuk sifat-sifat kompleks yang dikendalikan banyak gen. Selain BLUP dan GBLUP, pendekatan Bayesian methods juga mulai banyak digunakan dalam analisis pemuliaan modern karena mampu menangani data genomik dalam jumlah sangat besar dan pola genetik yang kompleks. Penggunaan metode statistik modern ini menunjukkan bahwa seleksi genetik akuakultur telah berkembang dari pendekatan sederhana berbasis fenotip menuju sistem seleksi berbasis data molekuler dan komputasi canggih.

## B. *Marker Assisted Selection* (MAS)

*Marker-Assisted Selection* (MAS) merupakan pendekatan pemuliaan yang mengintegrasikan informasi dari marker DNA yang terkait dengan sifat-sifat produksi penting ke dalam keputusan seleksi. Prinsip dasarnya adalah mengidentifikasi marker yang terpaut (*linked*) atau berada dalam *linkage disequilibrium* (LD) dengan *quantitative trait loci* (QTL) lokus-lokus genomik yang memiliki pengaruh signifikan terhadap variasi sifat kuantitatif (Dekkers, 2004).

Dalam akuakultur, *Marker-Assisted Selection* telah berhasil diaplikasikan untuk berbagai sifat penting, terutama ketahanan terhadap penyakit. Studi *quantitative trait loci* pada salmon Atlantik telah mengidentifikasi sejumlah wilayah genomik yang berhubungan kuat dengan ketahanan terhadap ISA (*Infectious Salmon Anemia*) dan furunculosis (Moen *et al*., 2009). Pada ikan mas (*Cyprinus carpio*), marker yang terkait dengan ketahanan terhadap *Koi Herpesvirus* (KHV) telah diidentifikasi dan berpotensi digunakan dalam program seleksi (Palaiokostas *et al*., 2016).

Keterbatasan *Marker-Assisted Selection* konvensional adalah bahwa efek *quantitative trait loci* yang terdeteksi seringkali bersifat populasi-spesifik dan tidak selalu dapat ditransfer ke populasi atau lingkungan yang berbeda. Hal ini mendorong pengembangan pendekatan yang lebih komprehensif, yaitu *Genomic Selection* (GS), yang menggunakan seluruh informasi genomik secara simultan tanpa perlu identifikasi *quantitative trait loci* secara spesifik (Meuwissen *et al*., 2001).

## 1. Konsep Dasar *Marker-Assisted Selection*

*Marker-Assisted Selection* (MAS) merupakan pendekatan pemuliaan modern yang mengintegrasikan informasi marker DNA ke dalam proses seleksi genetik. Berbeda dengan seleksi konvensional yang hanya mengandalkan pengamatan fenotipik, *Marker-Assisted Selection* memungkinkan identifikasi individu unggul dilakukan langsung pada tingkat molekuler melalui analisis DNA. Prinsip utama *Marker-Assisted Selection* adalah penggunaan marker genetik yang memiliki hubungan erat dengan gen atau wilayah genom tertentu yang mengontrol sifat target. Marker tersebut dapat berada sangat dekat dengan gen target pada kromosom sehingga diwariskan bersama karakter unggul yang diinginkan. Dengan demikian, keberadaan marker tertentu dapat digunakan sebagai indikator keberadaan alel unggul pada suatu individu ikan.

Dalam genetika kuantitatif, marker DNA umumnya dikaitkan dengan *Quantitative Trait Loci* (QTL), yaitu wilayah genom yang memberikan kontribusi signifikan terhadap variasi sifat kuantitatif seperti pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pakan, dan kualitas daging. Identifikasi *quantitative trait loci* menjadi tahapan penting dalam penerapan *Marker-Assisted Selection* karena menentukan marker mana

yang relevan digunakan dalam program pemuliaan. Konsep *linkage disequilibrium* (LD) juga memiliki peran penting dalam *Marker-Assisted Selection*. LD menggambarkan hubungan non-acak antara marker DNA dan gen target dalam populasi. Semakin kuat hubungan antara marker dan *quantitative trait loci*, semakin tinggi akurasi seleksi yang dapat dicapai menggunakan marker tersebut.

Keunggulan utama *Marker-Assisted Selection* adalah kemampuannya melakukan seleksi sejak fase awal kehidupan bahkan sebelum sifat target muncul secara fenotipik. Hal ini sangat penting untuk karakter yang sulit diamati secara langsung, memerlukan waktu lama untuk dievaluasi, atau bersifat destruktif dalam pengukurannya. Dengan perkembangan teknologi molekuler, *Marker-Assisted Selection* kini menjadi salah satu strategi penting dalam *selective breeding* modern karena mampu meningkatkan efisiensi, kecepatan, dan akurasi proses pemuliaan ikan.

## 2. Aplikasi *Marker-Assisted Selection* dalam Akuakultur

Dalam industri akuakultur, *Marker-Assisted Selection* telah berhasil diterapkan untuk berbagai sifat produksi penting, terutama ketahanan terhadap penyakit. Penyakit merupakan salah satu faktor utama penyebab kerugian ekonomi dalam budidaya ikan sehingga pengembangan strain tahan penyakit menjadi prioritas utama dalam program pemuliaan modern. Pada salmon Atlantik, berbagai studi *quantitative trait loci* telah berhasil mengidentifikasi wilayah genom yang berkaitan dengan ketahanan terhadap *Infectious Salmon Anemia* (ISA) dan furunculosis. Marker genetik yang berasosiasi dengan resistensi penyakit tersebut kemudian digunakan dalam proses seleksi untuk menghasilkan populasi salmon yang lebih tahan terhadap infeksi.

Pada ikan mas (*Cyprinus carpio*), penelitian juga berhasil menemukan marker yang berkaitan dengan ketahanan terhadap *Koi Herpesvirus* (KHV). Penyakit KHV dikenal sangat mematikan dan mampu menyebabkan mortalitas massal pada budidaya ikan mas. Dengan bantuan *Marker-Assisted Selection*, individu yang membawa alel resistensi dapat diidentifikasi lebih awal sehingga peluang menghasilkan strain tahan penyakit menjadi lebih besar. Selain ketahanan penyakit, *Marker-Assisted Selection* juga diterapkan untuk seleksi sifat pertumbuhan, efisiensi pakan, kualitas fillet, toleransi lingkungan, dan performa reproduksi. Pada beberapa spesies ikan

budidaya, marker tertentu telah digunakan untuk mendeteksi gen yang berkaitan dengan laju pertumbuhan cepat dan efisiensi konversi pakan.

Teknologi *Marker-Assisted Selection* juga dimanfaatkan dalam identifikasi jenis kelamin dan produksi populasi monoseks pada spesies tertentu seperti nila. Karena ikan jantan pada beberapa spesies memiliki pertumbuhan lebih cepat dibandingkan betina, identifikasi marker terkait kromosom seks menjadi sangat penting dalam program breeding komersial. Aplikasi *Marker-Assisted Selection* menunjukkan bahwa pemuliaan modern tidak lagi hanya mengandalkan observasi fenotipik, tetapi telah bergerak menuju pendekatan berbasis informasi molekuler yang lebih presisi dan ilmiah.

## 3. Keunggulan dan Keterbatasan *Marker-Assisted Selection*

*Marker-Assisted Selection* memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan metode seleksi konvensional. Salah satu keunggulan utama adalah kemampuannya meningkatkan akurasi seleksi karena identifikasi individu unggul dilakukan langsung berdasarkan informasi genetik, bukan hanya pengamatan fenotip yang dapat dipengaruhi lingkungan. *Marker-Assisted Selection* juga memungkinkan seleksi dilakukan pada usia dini sehingga mempercepat siklus pemuliaan. Individu yang tidak membawa alel unggul dapat dieliminasi lebih awal tanpa perlu dipelihara hingga dewasa. Hal ini membantu mengurangi biaya produksi dan meningkatkan efisiensi program breeding.

Keunggulan lain adalah kemampuan *Marker-Assisted Selection* dalam menangani sifat-sifat yang sulit diukur secara langsung. Karakter seperti ketahanan penyakit, kualitas karkas, dan efisiensi pakan sering kali membutuhkan pengujian khusus yang mahal dan memakan waktu. Dengan marker genetik, proses identifikasi sifat tersebut menjadi lebih praktis dan efisien. Meskipun demikian, *Marker-Assisted Selection* juga memiliki beberapa keterbatasan. Salah satu kelemahan utama adalah efek *quantitative trait loci* yang sering bersifat populasi-spesifik. Marker yang efektif pada satu populasi belum tentu memiliki hubungan yang sama pada populasi lain karena perbedaan struktur genetik dan lingkungan budidaya.

Selain itu, sebagian besar sifat produksi pada ikan merupakan sifat poligenik yang dikendalikan oleh banyak gen dengan efek kecil. Dalam kondisi seperti ini, penggunaan hanya beberapa marker *quantitative trait loci* sering kali tidak cukup untuk menjelaskan

keseluruhan variasi genetik suatu sifat. Keterbatasan lainnya adalah kebutuhan infrastruktur laboratorium molekuler dan biaya analisis genetik yang relatif tinggi, terutama pada tahap awal pengembangan marker. Walaupun biaya teknologi genomik terus menurun, implementasi *Marker-Assisted Selection* pada spesies minor masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomi. Oleh karena itu, penggunaan *Marker-Assisted Selection* perlu dikombinasikan dengan pendekatan pemuliaan lain agar hasil seleksi menjadi lebih optimal dan berkelanjutan.

## 4. Perkembangan *Marker-Assisted Selection* menuju *Genomic Selection*

Keterbatasan *Marker-Assisted Selection* konvensional mendorong berkembangnya pendekatan yang lebih komprehensif, yaitu *Genomic Selection* (GS). Jika *Marker-Assisted Selection* hanya menggunakan sejumlah marker yang terkait dengan *quantitative trait loci* tertentu, maka *genomic selection* memanfaatkan seluruh informasi genomik secara simultan untuk memprediksi nilai genetik individu. Pendekatan *genomic selection* menggunakan ribuan hingga jutaan marker SNP yang tersebar di seluruh genom sehingga mampu menangkap hampir seluruh variasi genetik yang memengaruhi sifat kuantitatif. Dengan demikian, prediksi nilai pemuliaan menjadi lebih akurat dibandingkan pendekatan *Marker-Assisted Selection* berbasis beberapa marker saja.

*Genomic selection* sangat efektif untuk sifat-sifat kompleks dengan heritabilitas rendah hingga sedang, seperti ketahanan penyakit dan efisiensi pakan. Pada sifat-sifat tersebut, kontribusi masing-masing gen relatif kecil sehingga diperlukan pendekatan genomik menyeluruh untuk meningkatkan akurasi seleksi. Perkembangan teknologi *Next Generation Sequencing* (NGS), SNP chip, dan bioinformatika menyebabkan penerapan *genomic selection* menjadi semakin efisien dan terjangkau. Industri akuakultur modern kini mulai mengintegrasikan data genomik dengan metode statistik seperti *Genomic* BLUP (GBLUP) dan *machine learning* untuk meningkatkan presisi prediksi genetik.

Walaupun *Genomic Selection* mulai menggantikan sebagian fungsi *Marker-Assisted Selection* konvensional, marker-assisted selection tetap memiliki nilai penting terutama pada sifat-sifat yang dikendalikan oleh gen mayor dengan efek besar. Oleh karena itu,

*Marker-Assisted Selection* masih menjadi bagian penting dalam sistem pemuliaan ikan modern, khususnya pada program breeding yang membutuhkan identifikasi cepat terhadap alel tertentu. Transformasi dari *Marker-Assisted Selection* menuju *Genomic Selection* menunjukkan perkembangan besar dalam bidang genetika akuakultur, di mana pemuliaan kini semakin berbasis teknologi genomik dan analisis data molekuler berpresisi tinggi.

## C. *Genomic Selection* dalam Akuakultur

*Genomic Selection* merupakan revolusi metodologis dalam pemuliaan hewan yang diusulkan oleh Meuwissen, Hayes, dan Goddard pada tahun 2001 dan kini telah menjadi standar industri dalam berbagai program pemuliaan ternak dan ikan komersial. *Genomic Selection* memanfaatkan ribuan hingga ratusan ribu *Single Nucleotide Polymorphisms* yang tersebar di seluruh genom untuk mengestimasi *Genomic Estimated Breeding Values*, yaitu nilai pemuliaan genomik yang memiliki akurasi lebih tinggi dibandingkan metode berbasis silsilah (*pedigree*) konvensional.

Implementasi *Genomic Selection* dalam akuakultur pertama kali dilaporkan secara luas pada industri salmon Atlantik di Norwegia yang menggunakan *Single Nucleotide Polymorphism chip* berkapasitas 5.000, kemudian berkembang menjadi 50.000 dan 200.000 penanda genetik untuk melakukan *genotyping* terhadap seluruh kandidat seleksi. Hasilnya menunjukkan peningkatan akurasi seleksi ketahanan penyakit dari sekitar 0,4–0,5 pada metode *pedigree* konvensional menjadi 0,6–0,8 dengan metode *Genomic Best Linear Unbiased Prediction* (Ødegård et al., 2014). Selain itu, interval generasi dapat dipersingkat karena seleksi dapat dilakukan sejak fase larva atau juvenil berdasarkan informasi genomik.

Berbagai metode statistik telah dikembangkan untuk mendukung implementasi *Genomic Selection*, antara lain *Genomic Best Linear Unbiased Prediction* yang menggunakan *genomic relationship matrix*, *BayesB*, *BayesC*, *Bayesian Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*, serta pendekatan *machine learning* seperti *Random Forest* dan *artificial neural networks*. Pemilihan metode yang paling sesuai bergantung pada arsitektur genetik sifat yang menjadi target seleksi,

ukuran populasi referensi, dan kerapatan penanda genetik yang tersedia (Daetwyler et al., 2013; Vallejo et al., 2017).

## 1. Konsep Dasar *Genomic Selection*

*Genomic Selection* merupakan salah satu inovasi terbesar dalam genetika kuantitatif modern yang mengubah paradigma pemuliaan hewan dan ikan. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Meuwissen, Hayes, dan Goddard pada tahun 2001 sebagai metode seleksi yang memanfaatkan seluruh informasi genomik secara simultan untuk memprediksi nilai genetik individu. Berbeda dengan *Marker-Assisted Selection* yang hanya menggunakan beberapa penanda genetik yang terkait dengan *Quantitative Trait Loci*, *Genomic Selection* memanfaatkan ribuan hingga ratusan ribu *Single Nucleotide Polymorphisms* yang tersebar di seluruh genom. Pendekatan ini memungkinkan sebagian besar variasi genetik yang memengaruhi sifat kuantitatif dapat ditangkap dalam model prediksi.

Dalam *Genomic Selection*, setiap individu dianalisis menggunakan data genomik untuk memperoleh *Genomic Estimated Breeding Value*, yaitu nilai pemuliaan genomik yang menggambarkan potensi genetik berdasarkan profil asam deoksiribonukleat (*Deoxyribonucleic Acid*) yang dimiliki. Semakin tinggi nilai *Genomic Estimated Breeding Value*, semakin besar peluang individu menghasilkan keturunan dengan performa unggul. Pendekatan ini sangat efektif untuk sifat kompleks yang dikendalikan banyak gen dengan efek kecil, seperti pertumbuhan, efisiensi pakan, ketahanan penyakit, dan kualitas fillet. Pada sifat poligenik, penggunaan beberapa penanda genetik saja tidak cukup untuk menjelaskan seluruh variasi genetik sehingga diperlukan pendekatan genomik yang lebih komprehensif.

Keunggulan utama *Genomic Selection* adalah kemampuannya meningkatkan akurasi seleksi dibandingkan metode berbasis silsilah (*pedigree*) konvensional. Selain itu, seleksi dapat dilakukan sejak fase larva atau juvenil tanpa harus menunggu ikan mencapai ukuran panen, sehingga interval generasi menjadi lebih pendek dan kemajuan genetik dapat dicapai lebih cepat. Perkembangan teknologi *sequencing* dan *genotyping* modern juga membuat penerapan *Genomic Selection* semakin efisien dan terjangkau, sehingga saat ini menjadi standar baru dalam program pemuliaan akuakultur komersial di berbagai negara.

## 2. Implementasi *Genomic Selection* pada Industri Akuakultur

Penerapan *Genomic Selection* dalam akuakultur pertama kali berkembang secara luas pada industri salmon Atlantik di Norwegia. Industri ini menjadi pelopor penggunaan teknologi genomik karena memiliki program pemuliaan yang terorganisasi dengan baik serta didukung infrastruktur bioteknologi yang maju. Pada tahap awal, program pemuliaan salmon menggunakan *Single Nucleotide Polymorphism chip* berkapasitas 5.000 penanda genetik untuk melakukan *genotyping* kandidat seleksi. Seiring perkembangan teknologi, kerapatan penanda meningkat menjadi 50.000 hingga 200.000 *Single Nucleotide Polymorphisms*, sehingga resolusi analisis genomik dan akurasi prediksi nilai genetik menjadi semakin tinggi.

Hasil penerapan *Genomic Selection* pada salmon Atlantik menunjukkan peningkatan akurasi seleksi yang signifikan. Pada metode berbasis silsilah (*pedigree*) konvensional, akurasi seleksi untuk sifat ketahanan penyakit umumnya berkisar antara 0,4–0,5. Setelah menggunakan metode *Genomic Best Linear Unbiased Prediction*, akurasi meningkat menjadi sekitar 0,6–0,8 (Ødegård et al., 2014). Peningkatan ini memungkinkan identifikasi individu unggul secara lebih cepat dan tepat, sekaligus mengurangi kesalahan seleksi akibat pengaruh lingkungan.

Selain meningkatkan akurasi, *Genomic Selection* memungkinkan seleksi terhadap sifat yang sulit diukur secara langsung, seperti resistensi penyakit. Pada banyak kasus, pengujian ketahanan penyakit memerlukan *challenge test* yang bersifat destruktif sehingga tidak dapat diterapkan pada seluruh populasi. Dengan pendekatan genomik, sifat tersebut dapat diprediksi melalui profil asam deoksiribonukleat (*Deoxyribonucleic Acid*) tanpa pengujian langsung. Saat ini, *Genomic Selection* telah diterapkan tidak hanya pada salmon Atlantik, tetapi juga pada nila, ikan mas, lele, udang, dan berbagai spesies akuakultur lainnya, menjadikannya teknologi kunci dalam transformasi akuakultur modern berbasis data molekuler.

## 3. Metode Statistik dalam *Genomic Selection*

Keberhasilan *Genomic Selection* sangat bergantung pada metode statistik yang digunakan untuk mengolah data genomik dan memprediksi nilai genetik individu. Karena jumlah penanda *Single Nucleotide Polymorphisms* yang dianalisis sangat besar, diperlukan model

matematis yang mampu mengintegrasikan seluruh informasi genomik secara efisien dan akurat. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah *Genomic Best Linear Unbiased Prediction*, yang merupakan pengembangan dari *Best Linear Unbiased Prediction* konvensional dengan mengganti *relationship matrix* berbasis silsilah (*pedigree*) menjadi *genomic relationship matrix* yang dihitung langsung dari data *Single Nucleotide Polymorphisms*. Dengan pendekatan ini, hubungan genetik antarindividu dapat diperkirakan secara lebih akurat (Daetwyler et al., 2013).

Selain *Genomic Best Linear Unbiased Prediction*, berbagai pendekatan Bayesian juga digunakan dalam *Genomic Selection*, seperti *BayesB*, *BayesC*, dan *Bayesian Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*. Metode Bayesian memungkinkan estimasi efek penanda genetik dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi probabilitas tertentu sehingga lebih fleksibel dalam menangani sifat dengan arsitektur genetik kompleks. *BayesB* umumnya digunakan ketika hanya sebagian kecil penanda memiliki efek besar terhadap sifat target, sedangkan *Genomic Best Linear Unbiased Prediction* lebih sesuai untuk sifat poligenik yang dikendalikan banyak gen dengan efek kecil (Vallejo et al., 2017).

Perkembangan terbaru dalam *Genomic Selection* juga melibatkan penggunaan *machine learning* dan kecerdasan buatan. Algoritma seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Artificial Neural Networks* digunakan untuk meningkatkan kemampuan prediksi sifat kompleks. Pendekatan *machine learning* mampu mendeteksi pola nonlinier dan interaksi antargen yang sulit diidentifikasi oleh model statistik konvensional. Dengan dukungan komputasi modern dan *big data* genomik, metode ini diperkirakan akan memainkan peran penting dalam pemuliaan akuakultur masa depan (Vallejo et al., 2017).

## 4. Tantangan dan Prospek *Genomic Selection*

Walaupun *Genomic Selection* menawarkan berbagai keunggulan, implementasinya masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomi yang cukup besar. Salah satu kendala utama adalah tingginya biaya *genotyping* serta kebutuhan infrastruktur laboratorium molekuler yang memadai, terutama di negara berkembang dan pada spesies akuakultur minor. Selain itu, *Genomic Selection* memerlukan populasi referensi yang besar dengan data fenotipik dan genomik yang lengkap. Semakin

besar populasi referensi yang tersedia, semakin tinggi akurasi prediksi yang dapat dicapai, namun pengumpulan data tersebut membutuhkan biaya, waktu, dan sistem manajemen data yang kompleks.

Keberhasilan *Genomic Selection* juga sangat dipengaruhi oleh kualitas data fenotipik. Kesalahan dalam pengukuran performa produksi dapat menurunkan akurasi prediksi genomik. Di samping itu, interaksi genotipe × lingkungan (*genotype × environment interaction*) dapat menyebabkan performa genetik suatu strain berbeda pada kondisi budidaya yang berbeda, sehingga model prediksi yang efektif pada satu lingkungan belum tentu memberikan hasil yang sama pada lingkungan lainnya.

Meskipun demikian, kemajuan teknologi genomik terus menurunkan biaya analisis asam deoksiribonukleat (*Deoxyribonucleic Acid*). Teknologi seperti *low-density Single Nucleotide Polymorphism panel*, *genotype imputation*, dan *low-cost sequencing* semakin meningkatkan efisiensi program pemuliaan. Ke depan, *Genomic Selection* diperkirakan akan terintegrasi dengan kecerdasan buatan, *Internet of Things*, sensor digital, dan *big data analytics*, sehingga memungkinkan seleksi dilakukan secara lebih presisi, real-time, dan berbasis kombinasi data genomik, lingkungan, serta performa produksi. Transformasi ini menandai pergeseran menuju sistem akuakultur presisi berbasis genomik yang lebih ilmiah dan terukur.

## D. Seleksi Berbasis Karakter Unggul

Program pemuliaan ikan yang efektif harus memiliki tujuan pemuliaan (*breeding objective*) yang jelas dan terukur, yang mencerminkan nilai ekonomi dari berbagai sifat produksi dalam konteks sistem budidaya yang spesifik. Tujuan pemuliaan biasanya diformulasikan sebagai indeks agregat genetik $H = a_1G_1 + a_2G_2 + ... + anGn$, di mana $a_i$ adalah bobot ekonomi relatif sifat ke-i dan $G_i$ adalah nilai pemuliaan untuk sifat ke-i (Ponzoni & Nguyen, 2008).

Karakter-karakter yang umum menjadi target seleksi dalam program pemuliaan ikan komersial meliputi: (1) laju pertumbuhan dan bobot panen, (2) *feed conversion ratio*, (3) ketahanan terhadap penyakit spesifik, (4) kualitas produk (kandungan lemak, warna, tekstur fillet), (5) morfologi eksternal (untuk pasar hidup), (6) usia matang gonad, dan (7) toleransi terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Prioritas antar karakter

ini sangat bergantung pada sistem produksi dan segmen pasar yang dituju (Gjedrem & Baranski, 2009).

Tabel 5. Matriks Karakter Unggul Ikan dan Pendekatan Seleksi yang Direkomendasikan

| **Karakter Unggul** | **Bobot Ekonomi Relatif** | **Metode Seleksi Optimal** | **Kendala Utama** |
|---|---|---|---|
| Laju pertumbuhan | Sangat tinggi (+++) | *Genomic selection* | Korelasi negatif dengan kualitas |
| FCR (efisiensi pakan) | Sangat tinggi (+++) | *Genomic* + *phenotypic* | Sulit diukur individual |
| Ketahanan penyakit | Tinggi (++) | MAS + Challenge test | G×E *interaction* tinggi |
| Kualitas fillet | Sedang (+) | NIR + Genomic | Korelasi negatif pertumbuhan |
| Toleransi suhu | Meningkat (++) | QTL mapping + GS | Lingkungan uji kompleks |
| Reproduksi | Sedang (+) | *Phenotypic* + *family* | Heritabilitas rendah |

Matriks pada tabel tersebut menunjukkan bahwa setiap karakter unggul memerlukan strategi seleksi yang berbeda sesuai dengan kompleksitas genetik dan tingkat pengaruh lingkungan terhadap sifat tersebut. Program pemuliaan modern tidak hanya berfokus pada satu sifat tunggal, tetapi mengintegrasikan berbagai karakter ekonomi penting secara simultan agar diperoleh strain ikan yang produktif, efisien, tahan penyakit, dan memiliki kualitas produk yang sesuai dengan kebutuhan pasar akuakultur modern.

### 1. Konsep *Breeding Objective* dan Indeks Seleksi

Program pemuliaan ikan yang efektif selalu diawali dengan penetapan tujuan pemuliaan (*breeding objective*) yang jelas, terukur, dan sesuai dengan sistem produksi serta kebutuhan pasar. Tanpa tujuan yang terdefinisi dengan baik, proses seleksi akan cenderung tidak terarah dan

sulit memberikan dampak ekonomi yang optimal. Oleh karena itu, breeding objective menjadi fondasi utama dalam desain program genetik modern. Secara teoritis, tujuan pemuliaan diformulasikan dalam bentuk indeks agregat genetik yang menggabungkan beberapa sifat sekaligus. Indeks ini dinyatakan sebagai $H = a_1G_1 + a_2G_2 + ... + a_nG_n$, di mana $a_i$ adalah bobot ekonomi relatif dari setiap sifat, sedangkan $G_i$ adalah nilai pemuliaan (*breeding value*) dari sifat tersebut. Model ini memungkinkan penggabungan berbagai karakter penting dalam satu nilai seleksi komposit.

Pendekatan indeks seleksi ini sangat penting karena dalam praktik akuakultur, tidak ada satu sifat tunggal yang menentukan keberhasilan produksi. Sebaliknya, performa ekonomi ikan merupakan hasil interaksi berbagai sifat seperti pertumbuhan, efisiensi pakan, ketahanan penyakit, dan kualitas produk. Dengan indeks seleksi, keputusan pemilihan induk menjadi lebih objektif dan berbasis nilai ekonomi total. Penentuan bobot ekonomi setiap sifat menjadi aspek kritis dalam pembentukan indeks. Bobot ini biasanya ditentukan berdasarkan analisis biaya-produksi, harga pasar, serta kontribusi masing-masing sifat terhadap profitabilitas sistem budidaya. Oleh karena itu, *breeding objective* dapat berbeda antara satu negara, spesies, atau sistem produksi dengan yang lain. Pendekatan ini menunjukkan bahwa pemuliaan modern tidak lagi bersifat *single-trait selection*, tetapi telah berkembang menjadi *multi-trait optimization* yang lebih realistis dan ekonomis.

## 2. Karakter Utama dalam Seleksi Genetik Ikan

Dalam program pemuliaan ikan komersial, terdapat beberapa karakter utama yang menjadi fokus seleksi karena memiliki dampak langsung terhadap produktivitas dan keuntungan ekonomi. Karakter pertama dan paling penting adalah laju pertumbuhan dan bobot panen. Sifat ini menentukan seberapa cepat ikan mencapai ukuran pasar, sehingga sangat mempengaruhi efisiensi siklus produksi. Karakter kedua adalah *Feed Conversion Ratio* (FCR) atau efisiensi pakan. *Feed Conversion Ratio* menggambarkan kemampuan ikan dalam mengubah pakan menjadi biomassa tubuh. Semakin rendah nilai *Feed Conversion Rati*, semakin efisien sistem budidaya tersebut. Karena biaya pakan dapat mencapai sebagian besar biaya produksi, sifat ini memiliki nilai ekonomi yang sangat tinggi dalam program seleksi.

Karakter ketiga adalah ketahanan terhadap penyakit. Penyakit merupakan salah satu faktor risiko terbesar dalam akuakultur modern yang dapat menyebabkan kerugian besar dalam waktu singkat. Oleh karena itu, seleksi terhadap resistensi penyakit menjadi prioritas utama dalam banyak program breeding, terutama pada spesies intensif seperti salmon, nila, dan udang. Karakter keempat adalah kualitas produk, yang mencakup kandungan lemak, warna daging, tekstur, serta cita rasa fillet. Pada pasar premium, kualitas produk sering menjadi faktor penentu harga jual sehingga memiliki nilai ekonomi yang signifikan meskipun tidak setinggi pertumbuhan atau *Feed Conversion Ratio*.

Karakter lainnya mencakup toleransi terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu, salinitas, dan kadar oksigen, serta karakter reproduksi seperti fekunditas dan umur matang gonad. Meskipun kontribusinya terhadap ekonomi mungkin lebih rendah, sifat-sifat ini tetap penting untuk keberlanjutan produksi jangka panjang. Secara keseluruhan, kombinasi berbagai karakter ini membentuk profil ikan unggul yang tidak hanya cepat tumbuh, tetapi juga efisien, tahan penyakit, dan memiliki kualitas produk tinggi.

### 3. Strategi Seleksi untuk Setiap Karakter Unggul

Setiap karakter unggul dalam akuakultur memerlukan pendekatan seleksi yang berbeda sesuai dengan kompleksitas genetik dan besarnya pengaruh lingkungan terhadap sifat tersebut. Untuk laju pertumbuhan, metode yang paling efektif adalah *Genomic Selection* karena sifat ini bersifat poligenik dan dikendalikan oleh banyak gen dengan efek kecil. Pemanfaatan data genomik memungkinkan peningkatan akurasi prediksi nilai genetik bahkan sejak fase awal kehidupan.

*Feed Conversion Ratio* memerlukan kombinasi data fenotipik dan genomik. Tantangan utama dalam seleksi sifat ini adalah kesulitan mengukur konsumsi pakan secara individual pada sistem budidaya massal. Oleh karena itu, penggunaan model statistik dan sensor digital semakin banyak dikembangkan untuk meningkatkan akurasi pengukuran. Ketahanan penyakit umumnya diseleksi melalui kombinasi *Marker-Assisted Selection* dan *challenge test*. *Marker-Assisted Selection* digunakan untuk mengidentifikasi penanda genetik yang berkaitan dengan sistem imun, sedangkan *challenge test* digunakan untuk mengevaluasi respons ikan terhadap patogen dalam kondisi terkontrol.

Pada kualitas fillet, pendekatan seleksi sering menggabungkan teknologi *Near Infrared Spectroscopy* dengan *Genomic Selection*. Teknologi ini memungkinkan analisis komposisi daging secara cepat dan non-destruktif sehingga sesuai untuk program seleksi berskala besar. Sementara itu, toleransi terhadap suhu dan lingkungan ekstrem umumnya dianalisis menggunakan *Quantitative Trait Loci Mapping* dan *Genomic Selection* untuk mengidentifikasi wilayah genom yang berperan dalam adaptasi lingkungan. Adapun karakter reproduksi lebih banyak menggunakan *phenotypic selection* dan *family selection* karena heritabilitasnya relatif rendah serta sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan.

## E. Evaluasi Efektifitas Program Seleksi

Evaluasi efektivitas program seleksi genetik merupakan komponen yang tidak terpisahkan dari manajemen program pemuliaan yang bertanggung jawab. Tanpa evaluasi yang sistematis, kemajuan genetik yang sesungguhnya tidak dapat dibedakan dari efek perbaikan manajemen atau kondisi lingkungan yang lebih baik. Pendekatan standar untuk mengevaluasi respons seleksi adalah dengan membandingkan performa generasi-generasi seleksi menggunakan kelompok kontrol yang tidak diseleksi sebagai referensi (Gjedrem *et al*., 2012).

Respons seleksi yang diharapkan (R) dapat diprediksi menggunakan persamaan *breeders' equation*: $R = h^2 \times S$, di mana S adalah diferensial seleksi (perbedaan rata-rata fenotipik antara individu terpilih dan populasi asal). Monitoring aktual terhadap persamaan ini memberikan validasi empiris terhadap asumsi-asumsi model genetik yang digunakan. Dalam praktiknya, respons aktual sering berbeda dari prediksi akibat fluktuasi genetik (*genetic drift*), interaksi G×E, dan asumsi model yang tidak terpenuhi (Lynch & Walsh, 1998).

Evaluasi program pemuliaan komersial juga harus mempertimbangkan keberlanjutan keragaman genetik. Indikator monitoring yang direkomendasikan meliputi: laju *inbreeding* per generasi ($\Delta F$, target < 1% per generasi), *effective population size* (Ne > 50-100), distribusi kontribusi genetik founder, dan tren heterozigositas genomik. Pendekatan *Optimal Contribution Selection* (OCS) dapat secara simultan memaksimalkan kemajuan genetik sambil

mempertahankan laju *inbreeding* pada batas yang ditentukan (Meuwissen, 1997).

## 1. Konsep Dasar Evaluasi Program Pemuliaan

Evaluasi efektivitas program seleksi genetik merupakan tahap kritis dalam siklus pemuliaan ikan modern yang berfungsi untuk menilai sejauh mana tujuan pemuliaan telah tercapai secara nyata. Tanpa evaluasi yang sistematis dan berkelanjutan, peningkatan performa yang terlihat pada generasi baru tidak dapat dipastikan sebagai hasil seleksi genetik, karena bisa saja dipengaruhi oleh perbaikan lingkungan, manajemen budidaya, atau faktor eksternal lainnya. Dalam konteks program pemuliaan terstruktur, evaluasi tidak hanya berfokus pada peningkatan satu sifat tertentu, tetapi juga pada keseimbangan antara kemajuan genetik, stabilitas performa, dan keberlanjutan populasi. Oleh karena itu, evaluasi harus dilakukan secara multidimensi dengan mempertimbangkan aspek biologis, statistik, dan ekonomi.

Salah satu pendekatan utama dalam evaluasi adalah penggunaan kelompok kontrol yang tidak mengalami seleksi. Kelompok kontrol ini berfungsi sebagai pembanding untuk mengukur sejauh mana perubahan yang terjadi pada populasi seleksi benar-benar disebabkan oleh proses seleksi genetik. Tanpa kontrol yang jelas, interpretasi hasil seleksi dapat menjadi bias. Selain itu, evaluasi juga harus dilakukan secara longitudinal antar generasi. Perbandingan performa dari generasi ke generasi memungkinkan peneliti melihat tren kemajuan genetik secara berkelanjutan, bukan hanya perubahan sesaat yang bersifat sementara. Dengan demikian, evaluasi program pemuliaan merupakan bagian integral dari manajemen genetik yang bertujuan memastikan bahwa seleksi yang dilakukan benar-benar memberikan dampak nyata dan terukur terhadap peningkatan kualitas populasi ikan.

## 2. Pengukuran Respons Seleksi dan *Breeder's Equation*

Respons seleksi (R) merupakan parameter utama dalam menilai keberhasilan suatu program pemuliaan. Secara teoritis, respons seleksi dapat diprediksi menggunakan *breeder's equation*, yaitu $R = h^2 \times S$. Dalam persamaan ini, $h^2$ merupakan heritabilitas sifat, sedangkan S adalah diferensial seleksi yang menggambarkan perbedaan rata-rata fenotip antara individu terpilih dan populasi awal. Persamaan ini memberikan dasar matematis yang sederhana namun sangat penting

dalam genetika kuantitatif. Dengan mengetahui nilai heritabilitas dan intensitas seleksi, peneliti dapat memperkirakan besarnya kemajuan genetik yang diharapkan dalam satu generasi seleksi.

Namun dalam praktiknya, respons seleksi aktual sering kali berbeda dari nilai prediksi teoritis. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti genetic drift, kesalahan pengukuran fenotip, perubahan lingkungan, serta adanya interaksi *genotype* × *environment* (G×E) yang tidak diperhitungkan dalam model awal. Selain itu, asumsi dalam *breeder's equation* seperti *random mating* dan stabilitas varians genetik tidak selalu terpenuhi dalam kondisi lapangan. Oleh karena itu, evaluasi empiris sangat diperlukan untuk memvalidasi apakah model prediksi sesuai dengan realitas biologis di lapangan.

Dalam program pemuliaan modern, pengukuran respons seleksi tidak hanya dilakukan pada satu generasi, tetapi juga dianalisis secara kumulatif untuk melihat total genetic gain yang dicapai selama beberapa siklus seleksi. Analisis ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang efektivitas jangka panjang program pemuliaan. Dengan demikian, *breeder's equation* tidak hanya berfungsi sebagai alat prediksi, tetapi juga sebagai kerangka evaluasi untuk menguji konsistensi antara teori genetika kuantitatif dan hasil empiris di lapangan.

### 3. Evaluasi Keragaman Genetik dan *Inbreeding*

Selain mengukur peningkatan performa, evaluasi program seleksi juga harus memperhatikan aspek keberlanjutan genetik, khususnya terkait keragaman genetik dan tingkat inbreeding. Program pemuliaan yang terlalu berfokus pada peningkatan satu sifat tanpa mempertimbangkan keragaman genetik dapat menyebabkan penurunan kualitas populasi dalam jangka panjang. Salah satu indikator utama yang digunakan adalah laju *inbreeding* per generasi ($\Delta F$). Nilai $\Delta F$ yang direkomendasikan dalam program pemuliaan ikan modern umumnya kurang dari 1% per generasi. Jika laju *inbreeding* terlalu tinggi, maka risiko munculnya *inbreeding depression* akan meningkat, yang dapat menurunkan performa pertumbuhan, fertilitas, dan ketahanan penyakit.

Selain itu, *effective population size* (Ne) juga menjadi parameter penting dalam evaluasi. Nilai Ne minimal yang disarankan adalah antara 50 hingga 100 individu per generasi untuk menjaga stabilitas variabilitas genetik. Populasi dengan Ne yang terlalu kecil cenderung mengalami

kehilangan alel secara cepat akibat *genetic drift*. Distribusi kontribusi genetik *founder* juga perlu dianalisis untuk memastikan bahwa tidak ada individu tertentu yang memberikan kontribusi genetik berlebihan dalam populasi. Ketidakseimbangan kontribusi ini dapat mempercepat penurunan keragaman genetik.

Tren heterozigositas genomik juga digunakan sebagai indikator tambahan untuk memantau perubahan keragaman genetik dari waktu ke waktu. Penurunan heterozigositas yang signifikan dapat menjadi sinyal awal adanya erosi genetik dalam populasi seleksi. Dengan demikian, evaluasi keragaman genetik bukan hanya aspek tambahan, tetapi merupakan komponen fundamental dalam menjaga keberlanjutan program pemuliaan jangka panjang.



# BAB IV
# MANIPULASI REPRODUKSI DAN TEKNOLOGI PEMBENIHAN MODERN

## A. Rekayasa Hormonal pada Reproduksi Ikan

Reproduksi ikan merupakan proses yang sangat dipengaruhi oleh faktor hormonal, lingkungan, dan fisiologis yang kompleks. Pemahaman tentang poros *hipotalamus-hipofisis-gonad* (HPG axis) pada ikan menjadi dasar pengembangan teknologi rekayasa hormonal yang digunakan secara luas dalam industri pembenihan modern. Pada ikan teleostei, proses gametogenesis dan ovulasi diregulasi oleh serangkaian sinyal hormonal yang melibatkan *gonadotropin-releasing hormone* (GnRH), *luteinizing hormone* (LH), *follicle-stimulating hormone* (FSH), dan berbagai *steroid gonad* (Zohar *et al*., 2010).

Rekayasa hormonal dalam akuakultur bertujuan untuk: (1) menginduksi kematangan gonad pada kondisi di luar musim pemijahan alami, (2) menyinkronkan waktu ovulasi dalam populasi induk, (3) mengatasi kegagalan ovulasi spontan pada ikan yang dibudidayakan, dan (4) meningkatkan kualitas dan kuantitas gamet yang dihasilkan. Agen hormonal yang umum digunakan mencakup ekstrak hipofisis ikan (PG/Ovaprim), analog GnRH sintetis seperti GnRHa (*Buserelin, Leuprolein*), dan *dopamine antagonists* seperti *Domperidone* dan *Metoclopramide* (Mylonas *et al*., 2010).

Protokol pemijahan dengan hormon biasanya melibatkan suntikan tunggal atau ganda dengan dosis yang disesuaikan berdasarkan spesies, ukuran individu, dan tingkat kematangan gonad yang diestimasi dari pemeriksaan visual atau biopsi gonad. Penggunaan kombinasi GnRHa dengan *dopamine antagonist* terbukti lebih efektif dibandingkan penggunaan GnRHa saja, karena *dopamine antagonist* memblokir efek inhibisi dopamine terhadap sekresi gonadotropin pada banyak spesies ikan (Yaron & Levavi-Sivan, 2011).

## 1. Dasar Fisiologi Sistem Reproduksi Ikan (HPG Axis)

Dasar fisiologi sistem reproduksi ikan dikendalikan oleh mekanisme neuroendokrin yang dikenal sebagai *Hypothalamus-Pituitary-Gonad Axis*. Sistem ini merupakan jalur komunikasi hormonal yang menghubungkan otak dengan organ reproduksi sehingga mengatur perkembangan gonad, pematangan gamet, hingga proses pemijahan. *Hypothalamus-Pituitary-Gonad Axis* terdiri atas tiga komponen utama, yaitu hipotalamus, kelenjar pituitari (hipofisis), dan gonad (testis atau ovarium), yang bekerja secara terkoordinasi dalam mengendalikan fungsi reproduksi ikan.

Proses reproduksi dimulai ketika hipotalamus menerima berbagai rangsangan lingkungan, seperti perubahan suhu, *photoperiod*, curah hujan, kualitas air, serta ketersediaan pakan. Sebagai respons terhadap rangsangan tersebut, hipotalamus mensekresikan hormon *Gonadotropin-Releasing Hormone* yang berfungsi menstimulasi kelenjar pituitari. Selanjutnya, pituitari melepaskan hormon gonadotropin, yaitu *Follicle Stimulating Hormone* dan *Luteinizing Hormone*. Kedua hormon ini berperan penting dalam mengatur perkembangan dan fungsi gonad selama siklus reproduksi.

Pada ikan betina, *Follicle Stimulating Hormone* merangsang pertumbuhan folikel ovarium dan proses *vitelogenesis*, yaitu pembentukan serta akumulasi kuning telur dalam oosit. Sementara itu, *Luteinizing Hormone* berperan dalam pematangan akhir oosit, ovulasi, dan pelepasan telur saat pemijahan. Pada ikan jantan, *Follicle Stimulating Hormone* mendukung proses *spermatogenesis* atau pembentukan sel sperma, sedangkan *Luteinizing Hormone* merangsang produksi hormon steroid yang diperlukan untuk pematangan sperma dan perilaku reproduksi. Aktivitas kedua hormon tersebut menyebabkan

gonad menghasilkan hormon steroid reproduksi, seperti estrogen, progesteron, dan androgen.

Hormon steroid yang diproduksi oleh gonad memiliki fungsi ganda. Selain mengatur perkembangan sel kelamin dan pematangan gonad, hormon-hormon tersebut juga memberikan *feedback* kepada hipotalamus dan pituitari untuk menjaga keseimbangan sistem reproduksi. Mekanisme *feedback* ini dapat bersifat positif maupun negatif, tergantung pada tahap siklus reproduksi yang sedang berlangsung. Dengan adanya sistem regulasi tersebut, produksi hormon reproduksi dapat berlangsung secara terkontrol dan sesuai dengan kebutuhan fisiologis ikan.

*Hypothalamus-Pituitary-Gonad Axis* merupakan pusat pengendali reproduksi pada ikan yang mengintegrasikan sinyal lingkungan dengan respons hormonal untuk memastikan keberhasilan reproduksi. Pemahaman mengenai mekanisme *Hypothalamus-Pituitary-Gonad Axis* sangat penting dalam bidang akuakultur dan pemuliaan ikan karena menjadi dasar dalam pengembangan teknologi reproduksi, seperti induksi pemijahan buatan, manipulasi hormon, sinkronisasi pematangan gonad, serta peningkatan efisiensi produksi benih ikan.

## 2. Prinsip dan Tujuan Rekayasa Hormonal dalam Akuakultur

Rekayasa hormonal dalam akuakultur merupakan intervensi bioteknologi yang bertujuan mengontrol proses reproduksi ikan melalui manipulasi sistem endokrin. Teknologi ini menjadi sangat penting dalam industri pembenihan karena reproduksi alami ikan budidaya sering tidak konsisten, terutama di luar kondisi lingkungan optimal. Tujuan utama dari rekayasa hormonal adalah menginduksi kematangan gonad pada waktu yang diinginkan, sehingga pemijahan dapat dilakukan secara terjadwal dan tidak tergantung pada musim alami. Hal ini memungkinkan produksi benih ikan dilakukan sepanjang tahun, yang sangat penting untuk memenuhi kebutuhan industri akuakultur skala besar.

Selain itu, rekayasa hormonal juga bertujuan menyinkronkan waktu ovulasi atau spermiation dalam satu populasi induk. Sinkronisasi ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pemijahan buatan, karena memudahkan pengumpulan gamet secara serempak dan meningkatkan tingkat keberhasilan fertilisasi. Tujuan lainnya adalah mengatasi kegagalan ovulasi spontan yang sering terjadi pada ikan

budidaya akibat stres lingkungan, kepadatan, atau kondisi fisiologis yang tidak optimal. Dengan bantuan hormon, proses pematangan akhir gonad dapat dipicu secara artifisial sehingga ikan tetap dapat bereproduksi secara efektif.

Rekayasa hormonal juga digunakan untuk meningkatkan kualitas gamet, baik dari segi jumlah, motilitas sperma, maupun kualitas telur. Gamet yang berkualitas tinggi akan menghasilkan tingkat fertilisasi dan daya tetas yang lebih baik, sehingga meningkatkan efisiensi produksi benih. Dengan demikian, rekayasa hormonal tidak hanya berfungsi sebagai alat induksi pemijahan, tetapi juga sebagai teknologi manajemen reproduksi yang strategis dalam sistem akuakultur modern.

### 3. Jenis Hormon dan Agen Reproduksi yang Digunakan

Dalam praktik akuakultur, berbagai jenis hormon dan agen kimia digunakan untuk mengontrol proses reproduksi ikan. Salah satu yang paling tradisional adalah ekstrak hipofisis ikan (*pituitary gland extract*), yang mengandung hormon gonadotropin alami dan telah lama digunakan dalam pembenihan ikan air tawar. Produk komersial seperti Ovaprim juga banyak digunakan karena mengandung kombinasi analog GnRH dan *dopamine antagonist*. Kombinasi ini bekerja secara sinergis untuk merangsang pelepasan gonadotropin dari hipofisis dan menghilangkan hambatan dopaminergik terhadap proses reproduksi.

GnRH analog sintetis (GnRHa) seperti Buserelin dan Leuprolide merupakan agen hormonal yang sangat efektif dalam merangsang sekresi LH dan FSH. GnRHa sering digunakan dalam bentuk injeksi tunggal atau implantasi, tergantung pada spesies ikan dan tujuan pemijahan. Selain GnRHa, *dopamine antagonist* seperti *Domperidone* dan *Metoclopramide* juga memainkan peran penting dalam rekayasa hormonal. Pada banyak spesies ikan, dopamin berfungsi sebagai inhibitor alami sekresi gonadotropin, sehingga penghambatan dopamin diperlukan untuk memastikan respon hormonal yang optimal.

Kombinasi GnRHa dengan *dopamine antagonist* terbukti lebih efektif dibandingkan penggunaan GnRHa tunggal karena mampu menghilangkan efek inhibisi dopamin secara simultan. Hal ini menghasilkan respons ovulasi yang lebih konsisten dan tingkat keberhasilan pemijahan yang lebih tinggi. Pemilihan jenis hormon dan dosis sangat bergantung pada spesies ikan, ukuran induk, tingkat kematangan gonad, serta kondisi fisiologis individu. Oleh karena itu,

protokol hormonal harus disesuaikan secara spesifik untuk setiap sistem budidaya.

### 4. Protokol Aplikasi dan Efektivitas Pemijahan

Protokol aplikasi hormon dalam akuakultur umumnya dilakukan melalui injeksi intramuskular atau intraperitoneal dengan dosis yang telah ditentukan berdasarkan spesies dan ukuran ikan. Dalam beberapa kasus, injeksi dilakukan dalam satu tahap (*single dose*), sedangkan pada spesies tertentu digunakan sistem dua tahap (*priming dose* dan *resolving dose*) untuk meningkatkan efektivitas pemijahan. Sebelum pemberian hormon, induk ikan biasanya dilakukan seleksi berdasarkan tingkat kematangan gonad yang dievaluasi melalui pengamatan morfologis atau biopsi gonad. Hal ini penting untuk memastikan bahwa ikan berada pada tahap fisiologis yang responsif terhadap stimulasi hormonal.

Setelah injeksi hormon diberikan, ikan ditempatkan dalam lingkungan yang terkontrol untuk meminimalkan stres. Faktor lingkungan seperti suhu, oksigen terlarut, dan kualitas air dijaga pada kondisi optimal untuk mendukung proses ovulasi dan spermiation. Waktu respons terhadap hormon bervariasi antar spesies, mulai dari beberapa jam hingga lebih dari satu hari. Oleh karena itu, monitoring intensif diperlukan untuk menentukan waktu *stripping* atau pengambilan gamet yang tepat.

Efektivitas rekayasa hormonal diukur berdasarkan beberapa parameter, seperti tingkat keberhasilan ovulasi, jumlah telur yang dihasilkan, tingkat fertilisasi, serta daya tetas embrio. Kombinasi parameter ini digunakan untuk mengevaluasi keberhasilan protokol hormonal secara keseluruhan. Secara umum, penggunaan rekayasa hormonal dalam akuakultur telah terbukti meningkatkan efisiensi produksi benih secara signifikan, memungkinkan kontrol reproduksi yang lebih presisi, serta mendukung keberlanjutan industri perikanan budidaya modern yang berbasis teknologi.

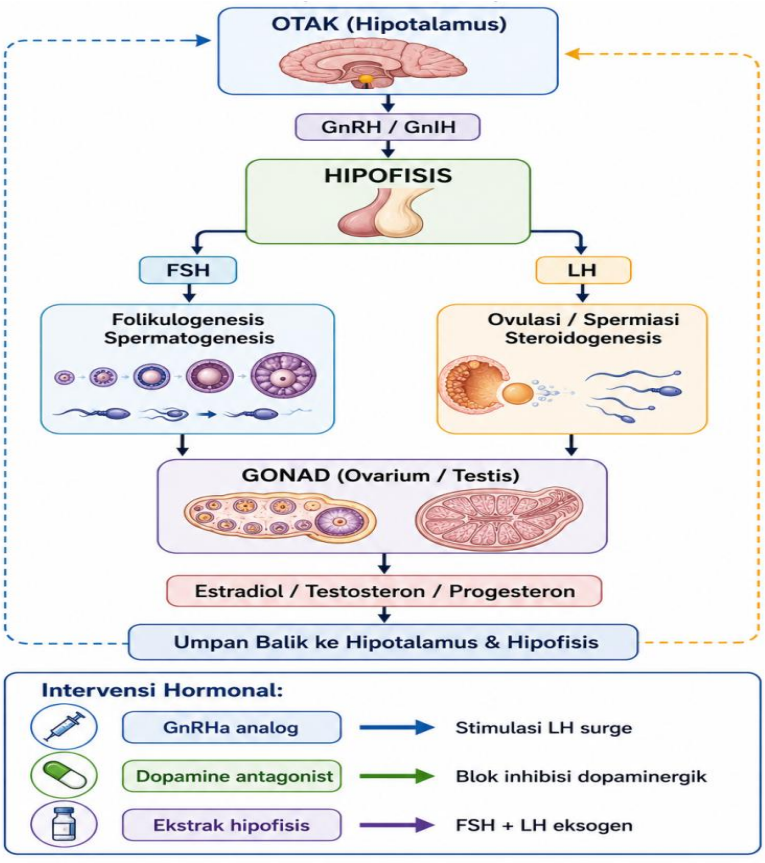
## B. *Induced Spawning* dan Teknologi Pemijahan

*Induced spawning* atau pemijahan terinduksi adalah teknik stimulasi pemijahan pada ikan yang tidak dapat memijah secara spontan dalam kondisi budidaya. Teknik ini telah menjadi salah satu fondasi utama industri pembenihan ikan modern, memungkinkan produksi larva

sepanjang tahun terlepas dari siklus musiman alami. Keberhasilan *induced spawning* sangat bergantung pada kondisi kematangan gonad induk, pemilihan jenis dan dosis hormon yang tepat, serta kondisi lingkungan (suhu, fotoperiod, kualitas air) yang mendukung (Stacey, 2015).

Teknik pemijahan semi-alami melibatkan induksi ovulasi dengan hormon kemudian membiarkan pemijahan berlangsung secara alami dalam bak atau kolam pemijahan khusus. Teknik ini lebih sederhana dan mengurangi stres penanganan, namun memberikan kontrol yang lebih rendah terhadap persilangan individu dan tidak cocok untuk program pemuliaan yang membutuhkan kontrol pedigree yang ketat. Sebaliknya, teknik stripped spawning (pengurutan gonad) memberikan kontrol penuh atas persilangan individu spesifik, yang sangat penting dalam program seleksi keluarga (Mylonas *et al*., 2010).

Gambar 4. Diagram Poros Hipotalamus-Hipofisis-Gonad (HPG Axis) Pada Ikan dan Titik Intervensi Hormonal.



Gambar 4 menjelaskan mekanisme kerja poros hormonal reproduksi ikan yang dikenal sebagai *Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis* (HPG Axis). Sistem ini mengatur seluruh proses reproduksi ikan, mulai dari pematangan gonad, pembentukan sel kelamin, hingga terjadinya ovulasi dan spermiasi. Dalam teknologi *induced spawning*, pemahaman terhadap poros hormonal ini sangat penting karena seluruh proses stimulasi pemijahan dilakukan dengan memanipulasi jalur hormonal reproduksi tersebut.

Bagian pertama pada diagram adalah otak, khususnya hipotalamus, yang berfungsi sebagai pusat pengendali awal reproduksi. Hipotalamus menghasilkan hormon GnRH (*Gonadotropin Releasing Hormone*) dan GnIH (*Gonadotropin Inhibitory Hormone*). GnRH berperan merangsang pelepasan hormon reproduksi dari hipofisis, sedangkan GnIH berfungsi menghambat proses tersebut. Aktivitas hipotalamus sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu air, fotoperiod, curah hujan, dan kualitas habitat. Pada kondisi lingkungan yang sesuai, produksi GnRH meningkat sehingga memicu proses reproduksi ikan.

Sinyal hormonal dari hipotalamus diteruskan menuju hipofisis, yaitu kelenjar endokrin utama yang menghasilkan hormon gonadotropin. Pada diagram terlihat dua hormon penting yang dihasilkan hipofisis, yaitu FSH (*Follicle Stimulating Hormone*) dan LH (*Luteinizing Hormone*). FSH berfungsi dalam proses folikulogenesis pada betina dan spermatogenesis pada jantan. Folikulogenesis merupakan proses perkembangan oosit atau telur dalam ovarium, sedangkan spermatogenesis adalah pembentukan sel sperma dalam testis. Hormon LH memiliki peran lebih lanjut dalam proses pematangan akhir gonad, ovulasi, spermiasi, dan steroidogenesis.

Tahap berikutnya adalah gonad, yang terdiri atas ovarium pada ikan betina dan testis pada ikan jantan. Gonad merupakan organ target utama dari hormon FSH dan LH. Pada ovarium, hormon tersebut merangsang perkembangan telur hingga mencapai kematangan akhir dan siap dikeluarkan melalui ovulasi. Pada testis, hormon tersebut memicu produksi dan pelepasan sperma. Gonad juga menghasilkan hormon steroid reproduksi seperti estradiol, testosteron, dan progesteron. Estradiol berperan penting dalam perkembangan telur dan vitelogenesis, testosteron mendukung perkembangan karakter reproduksi jantan dan

spermatogenesis, sedangkan progesteron terlibat dalam pematangan akhir oosit dan ovulasi.

Diagram juga menunjukkan adanya mekanisme umpan balik hormonal dari gonad menuju hipotalamus dan hipofisis. Hormon steroid yang dihasilkan gonad memberikan sinyal untuk mengatur keseimbangan sistem reproduksi. Jika kadar hormon tertentu terlalu tinggi atau terlalu rendah, hipotalamus dan hipofisis akan menyesuaikan produksi hormon reproduksi agar sistem tetap stabil. Mekanisme ini menjaga sinkronisasi antara perkembangan gonad dan kondisi fisiologis ikan. Pada bagian bawah diagram dijelaskan berbagai bentuk intervensi hormonal yang digunakan dalam induced spawning. Salah satunya adalah penggunaan GnRHa analog (*Gonadotropin Releasing Hormone analog*) yang berfungsi menstimulasi lonjakan hormon LH (LH *surge*). Lonjakan LH sangat penting karena menjadi pemicu utama ovulasi pada betina dan spermiasi pada jantan. GnRHa banyak digunakan dalam teknologi pemijahan modern karena memiliki efektivitas tinggi dalam merangsang pematangan gonad.

Intervensi berikutnya adalah penggunaan *dopamine antagonist*, yaitu senyawa yang menghambat efek dopamin. Pada banyak spesies ikan, dopamin berfungsi sebagai penghambat pelepasan gonadotropin dari hipofisis. Dengan menghambat kerja dopamin, pelepasan LH menjadi lebih optimal sehingga proses ovulasi dapat berlangsung lebih efektif. Oleh karena itu, banyak preparat hormon komersial mengombinasikan GnRHa dengan *dopamine antagonist* untuk meningkatkan keberhasilan pemijahan. Intervensi lain adalah penggunaan ekstrak hipofisis, yang mengandung hormon FSH dan LH eksogen. Ekstrak ini biasanya diperoleh dari hipofisis ikan donor dan digunakan untuk merangsang pematangan gonad secara langsung. Metode ini telah lama digunakan pada berbagai spesies ikan budidaya karena relatif efektif dan mudah diaplikasikan, terutama pada sistem pembenihan tradisional.

Gambar tersebut menunjukkan bahwa *induced spawning* pada ikan pada dasarnya merupakan manipulasi terkontrol terhadap sistem hormonal alami reproduksi. Dengan memahami hubungan antara hipotalamus, hipofisis, dan gonad, teknologi pemijahan modern mampu meningkatkan efisiensi produksi benih, mempercepat sinkronisasi pemijahan, serta memungkinkan produksi larva ikan berlangsung sepanjang tahun tanpa bergantung penuh pada musim reproduksi alami.

## 1. Konsep Dasar Induced Spawning dalam Akuakultur

*Induced spawning* atau pemijahan terinduksi merupakan teknik reproduksi buatan yang digunakan dalam akuakultur untuk merangsang induk ikan agar mengalami pematangan gonad akhir, ovulasi, dan pemijahan melalui pemberian hormon atau perlakuan tertentu. Teknik ini dikembangkan untuk mengatasi berbagai kendala reproduksi yang sering terjadi pada ikan budidaya, terutama pada spesies yang sulit memijah secara alami di lingkungan terkontrol. Melalui *induced spawning*, proses reproduksi dapat dilakukan secara lebih terencana sehingga ketersediaan benih dapat dipenuhi secara berkelanjutan sepanjang tahun.

Prinsip dasar *induced spawning* adalah memanipulasi sistem hormonal reproduksi ikan dengan menstimulasi jalur *Hypothalamus-Pituitary-Gonad Axis*. Pada kondisi normal, pemijahan dipicu oleh berbagai faktor lingkungan seperti suhu, curah hujan, kualitas air, arus, dan panjang penyinaran harian. Namun, dalam lingkungan budidaya, rangsangan alami tersebut sering kali tidak cukup untuk memicu pemijahan. Oleh karena itu, hormon eksogen diberikan untuk menggantikan atau memperkuat sinyal hormonal alami sehingga proses pematangan gamet dan pelepasan sel kelamin dapat berlangsung secara optimal.

Berbagai jenis hormon digunakan dalam teknik *induced spawning*, antara lain ekstrak hipofisis, *Gonadotropin-Releasing Hormone*, analog *Gonadotropin-Releasing Hormone*, *Human Chorionic Gonadotropin*, serta kombinasi hormon yang dilengkapi dengan senyawa penghambat dopamin. Hormon-hormon tersebut bekerja dengan merangsang pelepasan gonadotropin dari kelenjar pituitari atau secara langsung memengaruhi gonad untuk mempercepat pematangan telur dan sperma. Pemilihan jenis hormon, dosis, serta metode pemberian harus disesuaikan dengan spesies ikan, tingkat kematangan gonad, ukuran induk, dan kondisi lingkungan pemeliharaan.

Pelaksanaan *induced spawning* umumnya diawali dengan seleksi induk yang sehat dan telah mencapai tingkat kematangan gonad yang memadai. Setelah itu dilakukan penyuntikan hormon sesuai protokol yang telah ditetapkan. Dalam beberapa spesies, penyuntikan dilakukan dalam dua tahap, yaitu dosis pendahuluan dan dosis pemicu. Setelah periode laten tertentu, induk akan mengalami ovulasi atau spermiasi sehingga dapat dilakukan pemijahan alami di dalam wadah pemijahan

atau melalui teknik *stripping*, yaitu pengeluaran telur dan sperma secara manual untuk proses pembuahan buatan.

Keberhasilan *induced spawning* dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kualitas induk, ketepatan dosis hormon, kondisi fisiologis ikan, kualitas air, serta keterampilan teknis dalam pelaksanaannya. Apabila dilakukan dengan baik, teknik ini mampu meningkatkan tingkat keberhasilan pemijahan, jumlah telur yang dihasilkan, persentase pembuahan, daya tetas telur, dan kualitas larva. Oleh karena itu, *induced spawning* telah menjadi salah satu teknologi reproduksi yang sangat penting dalam industri akuakultur modern karena mendukung produksi benih secara massal, terkontrol, dan berkesinambungan untuk berbagai komoditas ikan budidaya.

## 2. Teknik Pemijahan Semi-Alami dan *Stripped Spawning*

Dalam praktik akuakultur, teknik pemijahan buatan umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu pemijahan semi-alami (*semi-natural spawning*) dan pemijahan dengan pengeluaran gamet secara manual (*stripped spawning*). Kedua metode ini bertujuan untuk meningkatkan keberhasilan reproduksi ikan, tetapi memiliki prosedur dan tingkat intervensi yang berbeda terhadap proses pemijahan. Pemijahan semi-alami (*semi-natural spawning*) merupakan metode yang menggabungkan stimulasi hormonal dengan perilaku pemijahan alami ikan. Pada teknik ini, induk jantan dan betina yang telah matang gonad diberikan hormon pemicu reproduksi untuk merangsang pematangan akhir gonad dan ovulasi. Setelah penyuntikan, induk ditempatkan dalam wadah atau kolam pemijahan yang telah disiapkan sehingga proses perkawinan, pelepasan telur, dan pengeluaran sperma berlangsung secara alami. Dengan demikian, pembuahan terjadi secara alami di dalam media pemijahan tanpa campur tangan langsung pada proses pengeluaran gamet. Teknik ini relatif sederhana, mengurangi stres akibat penanganan induk, serta banyak diterapkan pada spesies ikan yang masih menunjukkan respons reproduksi alami yang baik setelah stimulasi hormon.

Sebaliknya, *stripped spawning* merupakan teknik pemijahan buatan yang melibatkan pengeluaran telur dan sperma secara manual dari tubuh induk setelah proses pematangan gonad berhasil dirangsang. Pada metode ini, induk betina yang telah mengalami ovulasi dan induk jantan yang telah menghasilkan sperma siap dikeluarkan gametnya melalui

pemijatan lembut pada bagian perut menuju lubang genital. Telur dan sperma kemudian dikumpulkan dalam wadah kering untuk dilakukan pembuahan secara terkontrol oleh teknisi. Setelah pencampuran gamet, ditambahkan air atau larutan aktivator untuk memulai proses fertilisasi sebelum telur dipindahkan ke media inkubasi.

Keunggulan utama *stripped spawning* adalah tingkat kontrol yang lebih tinggi terhadap proses reproduksi. Teknik ini memungkinkan penentuan rasio telur dan sperma secara tepat, mengurangi risiko kehilangan telur selama pemijahan, meningkatkan efisiensi pembuahan, serta memudahkan pelaksanaan program pemuliaan dan persilangan terencana. Selain itu, metode ini sangat bermanfaat untuk spesies ikan yang sulit memijah secara alami meskipun telah diberikan stimulasi hormonal. Namun, *stripped spawning* memerlukan keterampilan teknis yang lebih tinggi karena penanganan yang kurang tepat dapat menyebabkan kerusakan telur, cedera pada induk, atau penurunan kualitas gamet.

Pemilihan antara pemijahan semi-alami dan *stripped spawning* bergantung pada karakteristik biologis spesies, tujuan produksi, serta fasilitas yang tersedia. Pemijahan semi-alami lebih sesuai untuk produksi benih skala rutin dengan intervensi minimal, sedangkan *stripped spawning* lebih banyak digunakan dalam kegiatan pembenihan intensif, penelitian reproduksi, konservasi plasma nutfah, dan program pemuliaan yang memerlukan pengendalian reproduksi secara lebih presisi. Kedua teknik tersebut telah menjadi komponen penting dalam teknologi reproduksi modern karena mampu meningkatkan efisiensi produksi benih dan mendukung keberlanjutan usaha akuakultur.

### 3. Regulasi Hormonal melalui Poros HPG (*Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis*)

Regulasi hormonal reproduksi ikan berlangsung melalui suatu sistem neuroendokrin yang dikenal sebagai *Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis*. Sistem ini merupakan mekanisme pengendalian utama yang mengoordinasikan komunikasi antara otak, kelenjar hipofisis, dan gonad dalam mengatur seluruh tahapan reproduksi, mulai dari perkembangan gonad, pembentukan gamet, pematangan seksual, hingga pemijahan. Keberhasilan reproduksi ikan sangat bergantung pada sinkronisasi kerja ketiga komponen tersebut yang dikendalikan oleh berbagai hormon reproduksi.

Proses regulasi dimulai di hipotalamus yang berfungsi sebagai pusat integrasi berbagai sinyal lingkungan dan fisiologis. Faktor-faktor seperti suhu air, *photoperiod*, curah hujan, kualitas air, ketersediaan pakan, dan kondisi fisiologis induk akan diterjemahkan menjadi sinyal hormonal. Sebagai respons, hipotalamus mensekresikan *Gonadotropin-Releasing Hormone* yang berperan merangsang kelenjar hipofisis untuk menghasilkan hormon gonadotropin. Selain itu, aktivitas *Gonadotropin-Releasing Hormone* juga dapat dipengaruhi oleh hormon penghambat seperti dopamin yang berfungsi menekan pelepasan hormon reproduksi pada beberapa spesies ikan.

Setelah menerima stimulasi dari *Gonadotropin-Releasing Hormone*, kelenjar hipofisis melepaskan dua hormon gonadotropin utama, yaitu *Follicle Stimulating Hormone* dan *Luteinizing Hormone*. *Follicle Stimulating Hormone* berperan dalam tahap awal perkembangan gonad, termasuk pertumbuhan folikel ovarium pada ikan betina dan proses *spermatogenesis* pada ikan jantan. Hormon ini juga merangsang produksi hormon steroid reproduksi yang diperlukan selama fase pematangan gonad. Sementara itu, *Luteinizing Hormone* berperan pada tahap akhir reproduksi, terutama dalam memicu pematangan akhir oosit, ovulasi, spermiasi, dan proses pemijahan.

Gonad sebagai organ target kemudian merespons hormon gonadotropin dengan menghasilkan berbagai hormon steroid reproduksi. Pada ikan betina, hormon estrogen berperan penting dalam proses *vitelogenesis*, yaitu pembentukan dan akumulasi kuning telur di dalam oosit. Menjelang ovulasi, produksi hormon pematangan meningkat untuk mempersiapkan pelepasan telur. Pada ikan jantan, androgen berfungsi mengatur perkembangan testis, produksi sperma, serta karakteristik reproduksi sekunder yang mendukung keberhasilan perkawinan.

Sistem *Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis* juga dikendalikan oleh mekanisme *feedback* hormonal yang menjaga keseimbangan reproduksi. Ketika kadar hormon steroid dalam darah meningkat, hormon tersebut dapat mengirimkan sinyal kembali ke hipotalamus dan hipofisis untuk mengurangi atau meningkatkan produksi hormon reproduksi sesuai kebutuhan fisiologis. Mekanisme *feedback* ini memastikan bahwa perkembangan gonad dan proses reproduksi berlangsung secara teratur serta sesuai dengan tahap siklus reproduksi ikan.

Dalam akuakultur, pemahaman mengenai regulasi hormonal melalui *Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis* menjadi dasar pengembangan berbagai teknologi reproduksi modern. Pemberian hormon eksogen seperti *Gonadotropin-Releasing Hormone*, analog *Gonadotropin-Releasing Hormone*, ekstrak hipofisis, dan hormon gonadotropik lainnya pada dasarnya bertujuan untuk memanipulasi jalur hormonal ini sehingga pematangan gonad, ovulasi, dan pemijahan dapat terjadi secara terkontrol. Oleh karena itu, penguasaan konsep *Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis* sangat penting dalam kegiatan pembenihan, pemuliaan, konservasi sumber daya genetik, dan peningkatan produktivitas akuakultur.

## C. *Cryopreservation* Sperma dan Embrio

*Cryopreservation* atau kriopreservasi adalah teknologi penyimpanan sel dan jaringan hidup pada suhu sangat rendah (biasanya -196°C menggunakan nitrogen cair) untuk jangka waktu yang tidak terbatas dengan mempertahankan viabilitas biologisnya. Dalam akuakultur, kriopreservasi sperma (kriosperma) telah berkembang menjadi alat yang sangat penting untuk konservasi plasma nutfah genetik, fasilitasi program seleksi lintas generasi dan lokasi, serta menjamin ketersediaan gamet jantan sepanjang tahun tanpa keterbatasan siklus musiman (Bart, 2009).

Prinsip dasar kriopreservasi melibatkan penggunaan *cryoprotectant* (pelindung beku) untuk mencegah pembentukan kristal es intraseluler yang dapat merusak membran dan organel sel. *Cryoprotectant* yang umum digunakan pada sperma ikan meliputi DMSO (*Dimethyl Sulfoxide*), *Methanol, Glycerol*, dan *Propylene Glycol*, yang ditambahkan ke dalam media pengencer (*diluent*) sebelum proses pembekuan. Laju pendinginan optimal bervariasi antar spesies dan harus ditentukan secara empiris (Cabrita *et al*., 2010).

Evaluasi kualitas sperma pasca-thawing meliputi analisis motilitas (menggunakan *Computer-Assisted Sperm Analysis*/CASA), viabilitas (pewarnaan membran integritas), dan integritas DNA sperma (uji Comet assay atau SCSA). Tingkat keberhasilan fertilisasi menggunakan kriosperma umumnya lebih rendah (50-80% dari kontrol segar) dan sangat dipengaruhi oleh kualitas sampel *pre-freeze*, protokol

pembekuan, dan proses thawing (Cabrita *et al*., 2010; Billard & Zhang, 2001).

Tabel 6. Parameter Kualitas Sperma Ikan Segar Dibandingkan Pasca-Thawing dan Standar Minimum yang dapat Diterima

| Parameter | Sperma Segar (Kontrol) | Post-thaw Optimal | Standar Minimum |
|---|---|---|---|
| Motilitas Total (%) | 85 – 98% | 60 – 80% | > 50% |
| Motilitas Progresif (%) | 70 – 90% | 45 – 65% | > 35% |
| Viabilitas (%) | 90 – 99% | 70 – 85% | > 60% |
| Integritas DNA (%DFI) | < 5% | 5 – 15% | < 25% |
| *Fertilization Rate* (%) | 85 – 98% | 55 – 80% | > 45% |
| *Hatching Rate* (%) | 80 – 95% | 50 – 75% | > 40% |

Menunjukkan perbandingan kualitas sperma ikan dalam kondisi segar (kontrol), setelah proses thawing pasca-kriopreservasi, serta standar minimum yang masih dapat diterima untuk digunakan dalam proses fertilisasi. Parameter-parameter tersebut menjadi indikator penting untuk mengevaluasi keberhasilan teknologi *cryopreservation* dalam mempertahankan fungsi biologis sperma setelah penyimpanan pada suhu ultra-rendah.

Data dalam tabel tersebut menunjukkan bahwa proses *cryopreservation* menyebabkan penurunan kualitas biologis sperma pada hampir seluruh parameter, namun sebagian besar fungsi reproduktif masih dapat dipertahankan pada tingkat yang cukup baik untuk aplikasi akuakultur. Keberhasilan kriopreservasi sangat dipengaruhi oleh jenis *cryoprotectant* yang digunakan, laju pendinginan, metode *thawing*, serta kualitas sperma sebelum pembekuan. Oleh karena itu, optimasi protokol kriopreservasi menjadi faktor utama dalam menjaga kualitas plasma

nutfah ikan untuk kebutuhan konservasi genetik dan program pemuliaan modern.

## 1. Konsep Dasar dan Prinsip *Cryopreservation* dalam Akuakultur

*Cryopreservation* merupakan teknologi penyimpanan materi biologis pada suhu sangat rendah untuk mempertahankan viabilitas dan integritas sel dalam jangka waktu yang panjang. Dalam akuakultur, teknologi ini terutama digunakan untuk menyimpan sperma, tetapi juga mulai dikembangkan untuk penyimpanan oosit, embrio, sel germinal, dan berbagai sumber daya genetik lainnya. Tujuan utama *cryopreservation* adalah menjaga kualitas materi genetik agar dapat digunakan kembali pada masa mendatang tanpa mengalami penurunan kemampuan reproduktif yang signifikan.

Prinsip dasar *cryopreservation* didasarkan pada penghentian hampir seluruh aktivitas metabolisme sel melalui penurunan suhu hingga mencapai kondisi kriogenik, umumnya menggunakan nitrogen cair pada suhu sekitar −196°C. Pada suhu tersebut, reaksi biokimia dan aktivitas fisiologis sel menjadi sangat lambat atau hampir berhenti sepenuhnya sehingga proses penuaan sel, degradasi biomolekul, dan kerusakan genetik dapat diminimalkan. Dengan demikian, materi genetik dapat disimpan selama bertahun-tahun tanpa kehilangan karakteristik biologis pentingnya.

Salah satu tantangan utama dalam *cryopreservation* adalah pembentukan kristal es di dalam maupun di luar sel selama proses pembekuan. Kristal es dapat merusak membran sel, organel, dan struktur intraseluler sehingga menyebabkan kematian sel setelah proses pencairan kembali. Untuk mengatasi masalah tersebut digunakan senyawa pelindung yang dikenal sebagai *cryoprotectant*. Senyawa ini berfungsi mengurangi pembentukan kristal es, menjaga keseimbangan osmotik, serta melindungi struktur sel selama proses pendinginan dan pembekuan. Beberapa *cryoprotectant* yang umum digunakan dalam akuakultur antara lain *dimethyl sulfoxide*, gliserol, metanol, dan etilen glikol.

Proses *cryopreservation* umumnya meliputi beberapa tahapan penting, yaitu pengumpulan materi biologis, pengenceran dengan larutan penyimpanan yang mengandung *cryoprotectant*, proses pendinginan bertahap, pembekuan, penyimpanan dalam nitrogen cair, serta pencairan kembali (*thawing*) saat materi akan digunakan. Setiap tahapan harus

dilakukan secara hati-hati karena perubahan suhu yang terlalu cepat atau terlalu lambat dapat menyebabkan kerusakan sel akibat stres osmotik maupun pembentukan kristal es. Oleh karena itu, laju pendinginan dan laju pencairan menjadi faktor kritis yang menentukan keberhasilan teknologi ini.

Dalam bidang akuakultur, *cryopreservation* memiliki berbagai manfaat strategis. Teknologi ini memungkinkan penyimpanan plasma nutfah dari strain unggul, menjaga keragaman genetik populasi budidaya, mendukung program pemuliaan, serta mempermudah pertukaran sumber daya genetik antarwilayah tanpa harus memindahkan induk hidup. Selain itu, *cryopreservation* berperan penting dalam konservasi spesies ikan langka atau terancam punah melalui pembentukan bank genetik yang dapat digunakan untuk mendukung program pemulihan populasi di masa depan.

Perkembangan teknologi *cryopreservation* telah menjadikannya salah satu komponen penting dalam bioteknologi reproduksi akuakultur modern. Dengan kemampuan menyimpan materi genetik dalam jangka panjang tanpa kehilangan kualitas biologis yang berarti, teknologi ini memberikan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi program pembenihan, mempercepat kemajuan pemuliaan, menjaga keberlanjutan sumber daya genetik, serta mendukung konservasi keanekaragaman hayati perairan.

## 2. *Cryoprotectant* dan Mekanisme Perlindungan Sel

*Cryoprotectant* merupakan senyawa yang digunakan dalam proses *cryopreservation* untuk melindungi sel dan jaringan dari kerusakan yang disebabkan oleh pembekuan pada suhu sangat rendah. Senyawa ini memiliki peran penting karena proses pembekuan dapat menyebabkan terbentuknya kristal es yang mampu merusak membran sel, organel, dan struktur intraseluler lainnya. Tanpa penggunaan *cryoprotectant*, sebagian besar sel akan mengalami kerusakan permanen atau kehilangan viabilitas setelah proses pencairan kembali. Oleh karena itu, keberhasilan *cryopreservation* sangat bergantung pada jenis, konsentrasi, dan cara penggunaan *cryoprotectant* yang tepat.

Mekanisme perlindungan utama *cryoprotectant* adalah mengurangi pembentukan kristal es selama proses pendinginan dan pembekuan. Ketika suhu menurun, air di dalam dan di luar sel cenderung membeku membentuk kristal es. Pembentukan kristal es intraseluler

sangat berbahaya karena dapat merobek membran dan merusak struktur sel. *Cryoprotectant* bekerja dengan menggantikan sebagian molekul air di sekitar komponen seluler serta menurunkan titik beku larutan sehingga jumlah kristal es yang terbentuk menjadi lebih sedikit. Dengan demikian, risiko kerusakan mekanis akibat kristalisasi dapat diminimalkan.

Selain menghambat pembentukan kristal es, *cryoprotectant* juga berfungsi menjaga keseimbangan osmotik selama proses pembekuan dan pencairan. Ketika air keluar dari sel akibat perubahan suhu, terjadi peningkatan konsentrasi zat terlarut yang dapat menyebabkan stres osmotik. Kondisi ini berpotensi menimbulkan penyusutan berlebihan atau pembengkakan sel yang merusak membran plasma. Kehadiran *cryoprotectant* membantu mengontrol pergerakan air dan menjaga stabilitas volume sel sehingga perubahan osmotik yang ekstrem dapat dihindari.

Berdasarkan kemampuannya menembus membran sel, *cryoprotectant* dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu *penetrating cryoprotectant* dan *non-penetrating cryoprotectant*. *Penetrating cryoprotectant* dapat masuk ke dalam sel dan melindungi struktur intraseluler secara langsung. Kelompok ini meliputi *dimethyl sulfoxide*, gliserol, metanol, dan etilen glikol. Senyawa-senyawa tersebut banyak digunakan dalam kriopreservasi sperma ikan karena mampu mengurangi pembentukan kristal es di dalam sel. Sebaliknya, *non-penetrating cryoprotectant* bekerja terutama di luar sel dengan meningkatkan tekanan osmotik dan membantu mengurangi kandungan air bebas. Contohnya adalah sukrosa, glukosa, trehalosa, protein kuning telur, dan berbagai jenis polimer biologis.

Efektivitas *cryoprotectant* dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis sel, spesies ikan, konsentrasi larutan, waktu paparan, serta metode pembekuan yang digunakan. Konsentrasi yang terlalu rendah dapat menyebabkan perlindungan menjadi tidak optimal, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menimbulkan efek toksik terhadap sel. Oleh karena itu, setiap spesies dan jenis materi biologis memerlukan formulasi *cryoprotectant* yang berbeda agar diperoleh keseimbangan antara perlindungan maksimal dan tingkat toksisitas yang minimal.

Dalam akuakultur, penggunaan *cryoprotectant* telah menjadi komponen utama dalam penyimpanan sperma, sel germinal, dan sumber daya genetik lainnya. Melalui mekanisme perlindungan terhadap pembentukan kristal es, stabilisasi membran sel, serta pengendalian stres

osmotik, *cryoprotectant* memungkinkan sel mempertahankan viabilitas, integritas genetik, dan kemampuan fertilisasi setelah proses pencairan. Dengan demikian, senyawa ini memegang peranan penting dalam keberhasilan teknologi *cryopreservation*, konservasi plasma nutfah, program pemuliaan, dan pelestarian keanekaragaman genetik ikan.

### 3. Evaluasi Kualitas Sperma Pasca-*Thawing*

Evaluasi kualitas sperma pasca-*thawing* merupakan tahap penting dalam teknologi *cryopreservation* untuk menentukan tingkat keberhasilan penyimpanan dan pembekuan sperma. Proses pembekuan dan pencairan kembali dapat menyebabkan berbagai kerusakan pada sel sperma, seperti gangguan membran plasma, penurunan aktivitas metabolik, kerusakan materi genetik, serta berkurangnya kemampuan fertilisasi. Oleh karena itu, kualitas sperma setelah proses *thawing* harus dievaluasi secara menyeluruh untuk memastikan bahwa sperma masih memiliki kemampuan reproduktif yang memadai dan layak digunakan dalam program pembenihan maupun pemuliaan ikan.

Salah satu parameter yang paling umum digunakan adalah motilitas sperma (*sperm motility*), yaitu kemampuan sperma untuk bergerak secara aktif setelah diaktifkan. Motilitas menjadi indikator utama karena kemampuan bergerak sangat menentukan keberhasilan sperma mencapai dan membuahi sel telur. Evaluasi motilitas biasanya meliputi persentase sperma yang bergerak, pola pergerakan, serta durasi pergerakan aktif. Semakin tinggi persentase dan kualitas pergerakan sperma pasca-*thawing*, semakin baik kualitas sperma yang dihasilkan dari proses *cryopreservation*.

Parameter berikutnya adalah viabilitas sperma (*sperm viability*), yaitu persentase sel sperma yang masih hidup setelah pencairan. Pengukuran viabilitas umumnya dilakukan menggunakan pewarnaan diferensial yang dapat membedakan sel hidup dan sel mati berdasarkan integritas membran plasma. Viabilitas yang tinggi menunjukkan bahwa membran sel masih mampu menjalankan fungsi fisiologis secara normal sehingga peluang keberhasilan fertilisasi menjadi lebih besar.

Integritas membran plasma (*plasma membrane integrity*) juga merupakan parameter penting dalam evaluasi sperma pasca-*thawing*. Membran plasma berfungsi mengatur pertukaran zat antara lingkungan eksternal dan bagian dalam sel. Kerusakan membran akibat pembentukan kristal es atau stres osmotik dapat mengganggu

keseimbangan sel dan menurunkan kemampuan fertilisasi. Oleh karena itu, pengujian integritas membran sering digunakan untuk menilai tingkat kerusakan yang terjadi selama proses pembekuan dan pencairan.

Selain membran plasma, integritas materi genetik juga perlu diperhatikan. Analisis kerusakan asam deoksiribonukleat (*deoxyribonucleic acid*) dilakukan untuk mengetahui apakah proses *cryopreservation* menyebabkan fragmentasi atau perubahan struktur genetik sperma. Kerusakan asam deoksiribonukleat yang tinggi dapat mengurangi keberhasilan pembuahan, menghambat perkembangan embrio, dan menurunkan kualitas keturunan. Oleh karena itu, stabilitas materi genetik menjadi salah satu indikator penting dalam evaluasi kualitas sperma beku. Parameter lain yang sering dianalisis adalah morfologi sperma (*sperm morphology*), yaitu bentuk dan struktur sel sperma setelah proses *thawing*. Pengamatan dilakukan untuk mengidentifikasi adanya kelainan pada kepala, bagian tengah, atau ekor sperma yang dapat mengganggu kemampuan bergerak dan membuahi telur. Semakin rendah tingkat abnormalitas morfologi, semakin baik kualitas sperma yang dihasilkan.

Evaluasi kualitas sperma pasca-*thawing* pada akhirnya harus dikaitkan dengan kemampuan fertilisasi aktual. Oleh karena itu, uji pembuahan (*fertilization test*) dan daya tetas telur sering digunakan sebagai parameter akhir untuk menilai keberhasilan *cryopreservation*. Tingkat pembuahan yang tinggi menunjukkan bahwa sperma masih mampu menjalankan fungsi reproduksinya secara efektif setelah penyimpanan dalam nitrogen cair. Dengan demikian, kombinasi pengukuran motilitas, viabilitas, integritas membran, kualitas materi genetik, morfologi, dan kemampuan fertilisasi memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kualitas sperma pasca-*thawing* serta efektivitas metode *cryopreservation* yang digunakan dalam akuakultur.

## 4. Aplikasi *Cryopreservation* dalam Konservasi dan Pemuliaan

*Cryopreservation* memiliki peran yang sangat penting dalam konservasi sumber daya genetik ikan, terutama untuk menjaga keberlanjutan plasma nutfah spesies budidaya maupun spesies liar yang terancam. Dengan teknologi ini, materi genetik dari individu unggul dapat disimpan dalam jangka panjang tanpa mengalami degradasi genetik yang signifikan. Dalam program pemuliaan, kriopreservasi memungkinkan fleksibilitas yang tinggi dalam desain persilangan. Induk

jantan dari berbagai generasi dapat digunakan kembali tanpa harus dipelihara secara hidup, sehingga mengurangi biaya pemeliharaan dan risiko kehilangan genetik akibat mortalitas.

Selain itu, *cryopreservation* juga memungkinkan pertukaran material genetik antar negara atau institusi tanpa harus memindahkan organisme hidup, sehingga mengurangi risiko biosekuriti. Hal ini sangat penting dalam industri akuakultur global yang semakin terintegrasi. Dengan demikian, *cryopreservation* bukan hanya teknologi penyimpanan, tetapi juga menjadi alat strategis dalam konservasi genetik, pemuliaan presisi, dan pengembangan sistem produksi akuakultur berkelanjutan.

## D. Teknologi *Sex Reversal*

*Sex reversal* atau pembalikan jenis kelamin adalah teknik manipulasi hormonal yang digunakan untuk mengubah fenotip seksual ikan dari satu jenis kelamin ke jenis kelamin lainnya, terlepas dari genotip kromosomalnya. Teknik ini paling umum diaplikasikan dalam budidaya ikan nila (*Oreochromis spp*.) untuk menghasilkan populasi monoseks jantan (*all-male*), yang memiliki keunggulan pertumbuhan 20-40% lebih cepat dibandingkan betina karena betina mengalokasikan energi untuk reproduksi (Beardmore *et al*., 2001).

Pada ikan nila, *sex reversal* dilakukan dengan memberikan pakan yang mengandung steroid androgen (biasanya 17α-*methyltestosteron*, 17α-MT) kepada larva selama 3-4 minggu pertama kehidupannya periode kritis saat diferensiasi kelamin berlangsung. Dosis standar yang digunakan adalah 60 mg 17α-MT per kg pakan, yang mampu menghasilkan populasi jantan fenotipik hingga >95% dari keturunan yang secara genetik berjenis kelamin betina maupun jantan (Beardmore *et al*., 2001).

Kekhawatiran tentang penggunaan hormon steroid sintetis dalam produksi makanan telah mendorong penelitian terhadap metode alternatif *sex reversal* yang lebih alami dan ramah lingkungan. Penggunaan fitosterol dari tanaman, manipulasi suhu inkubasi, dan pendekatan genetik seperti pemuliaan strain YY (jantan super) atau strain seksual secara genetik merupakan alternatif yang sedang intensif dikembangkan (Baroiller & D'Cotta, 2016).

## 1. Mekanisme dan Aplikasi *Sex Reversal* pada Ikan Budidaya

*Sex reversal* merupakan teknik manipulasi jenis kelamin yang bertujuan mengubah arah diferensiasi gonad ikan dari jenis kelamin genetik atau alami menuju jenis kelamin fenotipik yang diinginkan melalui perlakuan hormonal, lingkungan, atau kombinasi keduanya. Teknologi ini banyak diterapkan dalam akuakultur karena pada beberapa spesies ikan terdapat perbedaan pertumbuhan, ukuran tubuh, efisiensi pakan, atau nilai ekonomi antara ikan jantan dan betina. Dengan menghasilkan populasi yang didominasi oleh satu jenis kelamin, produktivitas budidaya dapat ditingkatkan secara signifikan.

Mekanisme *sex reversal* didasarkan pada fakta bahwa diferensiasi kelamin pada ikan bersifat lebih fleksibel dibandingkan vertebrata darat. Pada fase awal perkembangan, gonad ikan umumnya masih berada dalam kondisi belum terdiferensiasi sehingga arah perkembangannya dapat dipengaruhi oleh faktor hormonal. Pemberian hormon tertentu pada periode kritis perkembangan akan mengubah keseimbangan hormon reproduksi dalam tubuh sehingga proses diferensiasi gonad mengikuti jalur yang diinginkan. Apabila hormon androgen diberikan, perkembangan gonad cenderung mengarah menjadi testis, sedangkan pemberian hormon estrogen akan mendorong pembentukan ovarium.

Pada praktik akuakultur, *sex reversal* paling sering dilakukan menggunakan hormon steroid. Untuk menghasilkan populasi jantan, hormon androgen seperti *17α-methyltestosterone* sering digunakan melalui pakan, perendaman, atau metode injeksi. Sebaliknya, untuk menghasilkan populasi betina dapat digunakan hormon estrogen seperti *17β-estradiol*. Hormon diberikan selama periode diferensiasi gonad, yaitu tahap perkembangan ketika jaringan gonad masih sangat responsif terhadap pengaruh hormonal. Keberhasilan perlakuan sangat dipengaruhi oleh dosis hormon, lama pemberian, umur ikan, spesies, serta kondisi lingkungan pemeliharaan.

Selain manipulasi hormonal, beberapa spesies ikan juga menunjukkan respons terhadap faktor lingkungan, terutama suhu. Pada spesies tertentu, suhu pemeliharaan selama fase awal perkembangan dapat memengaruhi arah diferensiasi gonad melalui perubahan aktivitas gen dan produksi hormon reproduksi. Fenomena ini dikenal sebagai penentuan jenis kelamin yang dipengaruhi lingkungan. Namun, metode

hormonal umumnya lebih banyak digunakan karena memberikan hasil yang lebih konsisten dan mudah dikendalikan dalam skala produksi.

Aplikasi *sex reversal* dalam akuakultur sangat luas. Salah satu penerapan yang paling umum adalah produksi populasi jantan tunggal pada ikan nila karena ikan jantan memiliki laju pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan ikan betina. Selain meningkatkan pertumbuhan, populasi jantan tunggal juga dapat mengurangi reproduksi yang tidak terkendali di kolam budidaya sehingga energi ikan lebih banyak digunakan untuk pertumbuhan daripada untuk aktivitas reproduksi. Pada beberapa spesies lain, seperti ikan hias dan ikan konsumsi tertentu, populasi betina tunggal justru lebih diinginkan karena memiliki ukuran tubuh lebih besar atau karakter ekonomi yang lebih menguntungkan.

Teknologi *sex reversal* juga berperan penting dalam program pemuliaan modern. Individu hasil *sex reversal* dapat digunakan untuk menghasilkan induk fungsional yang secara genetik berbeda dari jenis kelamin fenotipiknya. Melalui teknik ini, pembudidaya dapat memproduksi populasi monoseks tanpa harus memberikan hormon secara terus-menerus pada generasi berikutnya. Pendekatan tersebut memungkinkan pengembangan strain unggul yang memiliki performa pertumbuhan lebih baik dan produktivitas yang lebih tinggi.

Meskipun memberikan banyak manfaat, penerapan *sex reversal* harus dilakukan secara hati-hati dengan memperhatikan dosis hormon, waktu perlakuan, keamanan lingkungan, serta ketentuan regulasi yang berlaku. Pengelolaan yang tepat akan memastikan bahwa teknologi ini dapat dimanfaatkan secara efektif untuk meningkatkan efisiensi produksi, mendukung program pemuliaan, dan memperkuat keberlanjutan sistem budidaya ikan modern.

## 2. Protokol, Efektivitas, dan Alternatif Teknologi *Sex Reversal*

Dalam praktik budidaya, *sex reversal* pada *Oreochromis niloticus* umumnya dilakukan dengan pemberian pakan yang mengandung hormon androgen sintetis *17α-methyltestosterone* (17α-MT) pada larva berumur 7–21 hari. Periode ini merupakan tahap paling sensitif terhadap diferensiasi kelamin. Dosis yang umum digunakan adalah sekitar 60 mg hormon per kg pakan, yang diberikan secara kontinu selama 3–4 minggu. Hasil dari perlakuan ini adalah peningkatan proporsi ikan jantan fenotipik hingga lebih dari 95%, bahkan pada populasi yang secara genetik campuran. Keberhasilan teknik ini sangat

dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suhu air, kepadatan larva, kualitas pakan, serta ketepatan waktu pemberian hormon. Ketidaktepatan pada salah satu faktor tersebut dapat menyebabkan tingkat keberhasilan *sex reversal* menurun secara signifikan atau menghasilkan individu interseks.

Meskipun efektif, penggunaan hormon steroid sintetis menimbulkan perhatian terkait keamanan lingkungan dan potensi residu pada produk perikanan. Oleh karena itu, berbagai pendekatan alternatif dikembangkan untuk menggantikan atau mengurangi penggunaan hormon sintetis. Pendekatan tersebut meliputi penggunaan senyawa alami seperti fitosterol dari tumbuhan, manipulasi suhu inkubasi untuk memengaruhi jalur diferensiasi kelamin, serta pendekatan genetik seperti pengembangan strain "YY *super male*" melalui seleksi dan rekayasa pemuliaan. Selain itu, teknologi *sex reversal* modern juga mulai mengarah pada integrasi dengan pendekatan molekuler untuk memahami gen-gen kunci yang mengatur determinasi kelamin. Dengan pemahaman ini, strategi produksi monoseks dapat dilakukan secara lebih presisi tanpa ketergantungan penuh pada hormon eksogen, sehingga lebih berkelanjutan dan sesuai dengan prinsip akuakultur ramah lingkungan.

## E. Sinkronisasi Kematangan Gonad

Sinkronisasi kematangan gonad merupakan teknik yang bertujuan untuk mengatur agar sejumlah besar induk betina mencapai tahap ovulasi secara bersamaan, yang sangat penting untuk manajemen operasional hatchery skala besar dan untuk program pemuliaan yang membutuhkan persilangan simultannya banyak individu dalam desain *factorial mating*. Teknik ini melibatkan kombinasi manipulasi fotoperiod, suhu, dan aplikasi hormonal yang terencana (Mylonas & Zohar, 2001).

*Implant hormon slow-release* seperti GnRHa yang dikemas dalam *pellet* EVAc (*Ethylene Vinyl Acetate Co-polymer*) atau *mikrokapsul* PLGA (*Poly Lactic-co-Glycolic Acid*) telah terbukti lebih efektif untuk sinkronisasi kematangan dibandingkan injeksi tunggal, karena memberikan pelepasan hormon yang berkelanjutan dan terkontrol selama beberapa minggu. Teknologi ini telah berhasil diaplikasikan pada berbagai spesies ikan bernilai ekonomi tinggi seperti kerapu, kakap, dan

ikan laut dalam lainnya yang sulit dipijahkan di luar habitat alaminya (Mylonas *et al*., 2010).

## 1. Konsep dan Signifikansi Sinkronisasi Kematangan Gonad

Sinkronisasi kematangan gonad merupakan upaya mengatur dan menyeragamkan waktu perkembangan gonad pada sekelompok induk ikan sehingga mencapai tingkat kematangan reproduksi yang relatif sama dalam periode tertentu. Konsep ini menjadi sangat penting dalam akuakultur karena kematangan gonad yang tidak seragam sering menyebabkan perbedaan waktu ovulasi, spermiasi, dan pemijahan, yang pada akhirnya dapat menurunkan efisiensi produksi benih. Melalui sinkronisasi kematangan gonad, proses reproduksi dapat dilakukan secara lebih terencana, terkontrol, dan efisien sesuai kebutuhan produksi.

Secara fisiologis, kematangan gonad dikendalikan oleh sistem hormonal reproduksi yang melibatkan *Hypothalamus–Pituitary–Gonad Axis*. Aktivitas sistem ini dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal, seperti umur, ukuran tubuh, status nutrisi, suhu air, *photoperiod*, kualitas lingkungan, serta kondisi kesehatan induk. Perbedaan respons individu terhadap faktor-faktor tersebut sering menyebabkan variasi tingkat kematangan gonad dalam satu populasi. Oleh karena itu, berbagai teknik manajemen dan manipulasi hormonal digunakan untuk mengurangi variasi tersebut dan menyelaraskan perkembangan reproduksi antarindividu.

Dalam praktik pembenihan, sinkronisasi kematangan gonad dapat dilakukan melalui pengaturan lingkungan pemeliharaan, perbaikan nutrisi induk, maupun pemberian hormon reproduksi. Pengelolaan faktor lingkungan seperti suhu, intensitas cahaya, dan kualitas air dapat membantu menciptakan kondisi yang mendukung perkembangan gonad secara seragam. Sementara itu, pemberian hormon reproduksi, seperti *Gonadotropin-Releasing Hormone* atau hormon gonadotropik lainnya, sering digunakan untuk mempercepat dan menyeragamkan proses pematangan akhir gonad menjelang pemijahan.

Signifikansi sinkronisasi kematangan gonad sangat besar dalam kegiatan akuakultur modern. Dengan tercapainya kematangan reproduksi yang seragam, proses pemijahan dapat dilakukan pada waktu yang sama sehingga memudahkan pengelolaan induk, pengumpulan gamet, dan penanganan telur. Keseragaman waktu pemijahan juga memungkinkan produksi benih dalam jumlah besar dengan umur yang

relatif sama, sehingga mempermudah pemeliharaan larva dan pendederan. Selain itu, sinkronisasi reproduksi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan tenaga kerja, fasilitas pembenihan, dan sumber daya lainnya.

Dari sudut pandang kualitas reproduksi, sinkronisasi kematangan gonad membantu meningkatkan peluang terjadinya pembuahan yang optimal karena telur dan sperma berada pada kondisi fisiologis terbaik pada waktu yang bersamaan. Ketidaksinkronan antara ovulasi dan spermiasi dapat menyebabkan penurunan kualitas gamet, rendahnya tingkat pembuahan, dan berkurangnya daya tetas telur. Oleh karena itu, pengaturan waktu reproduksi yang tepat menjadi faktor penting dalam keberhasilan pembenihan. Dalam program pemuliaan ikan, sinkronisasi kematangan gonad juga memiliki peran strategis karena memudahkan pelaksanaan persilangan terencana antarinduk yang dipilih berdasarkan karakter genetik tertentu. Keseragaman waktu reproduksi memungkinkan pengumpulan gamet dari beberapa individu unggul secara bersamaan sehingga proses seleksi dan persilangan dapat dilakukan dengan lebih efektif. Selain itu, sinkronisasi reproduksi mendukung pengelolaan plasma nutfah dan konservasi sumber daya genetik melalui pengaturan waktu pengambilan gamet untuk keperluan penyimpanan atau reproduksi buatan.

## 2. Teknik Aplikasi dan Teknologi Hormon *Slow-Release*

Sinkronisasi kematangan gonad dapat dilakukan melalui integrasi manipulasi lingkungan dan intervensi hormonal. Pengaturan fotoperiod dan suhu air digunakan sebagai pemicu awal untuk menyelaraskan kondisi fisiologis induk agar memasuki fase reproduksi pada tingkat yang relatif seragam. Setelah itu, induksi hormonal diberikan untuk menyamakan waktu ovulasi pada individu yang sudah berada pada tahap kematangan gonad akhir. Teknologi yang paling efektif saat ini adalah penggunaan *implant hormon slow-release*, khususnya *Gonadotropin-Releasing Hormone agonist* (GnRHa) yang diformulasikan dalam sistem pelepasan terkendali. Sistem ini menggunakan bahan seperti EVAc (*Ethylene Vinyl Acetate Copolymer*) atau mikrokapsul biodegradable seperti PLGA (*Poly Lactic-co-Glycolic Acid*). Teknologi ini memungkinkan hormon dilepaskan secara bertahap dalam jangka waktu beberapa hari hingga beberapa minggu sehingga memberikan stimulasi hormonal yang stabil dan berkelanjutan.

Pada spesies ikan bernilai ekonomi tinggi seperti kerapu (*Epinephelus spp*.), kakap (*Lutjanus spp*.), serta berbagai ikan laut budidaya lainnya, penerapan teknologi *implant slow-release* terbukti meningkatkan tingkat keberhasilan pemijahan dan menyamakan waktu ovulasi antar induk. Hal ini sangat penting karena banyak spesies laut memiliki siklus reproduksi yang sensitif terhadap perubahan lingkungan dan sulit diprediksi tanpa intervensi teknologi. Selain meningkatkan efisiensi produksi benih, sinkronisasi kematangan gonad juga memberikan keuntungan dalam aspek manajemen pemuliaan, seperti peningkatan akurasi pencatatan pedigree, pengurangan variasi waktu fertilisasi, serta peningkatan kontrol terhadap desain persilangan. Dengan demikian, teknik ini menjadi salah satu komponen penting dalam sistem reproduksi terkontrol pada akuakultur modern berbasis teknologi



# BAB V
# HIBRIDISASI DAN PEMBENTUKAN STRAIN UNGGUL

## A. Konsep Hibridisasi dalam Akuakultur

Hibridisasi adalah persilangan antara dua individu yang berbeda secara genetik, baik pada tingkat varietas, populasi, subspesies, maupun spesies yang berbeda. Dalam konteks akuakultur, hibridisasi telah lama dimanfaatkan sebagai alat untuk menggabungkan sifat-sifat unggul dari dua strain atau spesies yang berbeda ke dalam satu keturunan, atau untuk mengeksploitasi fenomena heterosis (*hybrid vigor*) yang sering terjadi pada keturunan hibrida (Bartley *et al*., 2001).

Hibridisasi interspesifik (antara spesies berbeda) umumnya menghasilkan keturunan yang steril (seperti pada hybrida nila O. niloticus × O. aureus), yang merupakan keunggulan bagi akuakultur karena mencegah reproduksi tidak terkontrol dan memungkinkan seluruh energi metabolik difokuskan pada pertumbuhan somatic. Hibridisasi intrasspesifik (antara populasi atau strain yang sama spesies) cenderung menghasilkan keturunan yang fertil dan merupakan strategi utama dalam pembentukan strain komersial unggul (Hulata, 2001).

Program hibridisasi yang sukses dalam akuakultur mencakup: (1) nila merah (hasil persilangan O. mossambicus × O. niloticus), (2) lele dumbo (Clarias gariepinus × C. macrocephalus), (3) hybrida striped bass (Morone saxatilis × M. chrysops) yang populer di budidaya AS, dan (4) hybrida ikan mas-karper yang dikembangkan di berbagai negara Asia. Masing-masing hybrida ini memiliki keunggulan spesifik yang

membuatnya lebih sesuai untuk kondisi budidaya tertentu dibandingkan induk parentalnya (Bartley *et al*., 2001).

Tabel 7. Kombinasi Hibrid Utama dalam Akuakultur Dunia dan Karakteristiknya

| Kombinasi Hibrida | Keunggulan Utama | Kelemahan | Adopsi Komersial |
|---|---|---|---|
| Nila merah (O. niloticus × O. mossambicus) | Warna merah, cepat besar, pasar premium | Ketidakstabilan warna generasi lanjut | Sangat luas (Asia, Afrika) |
| Lele dumbo (C. gariepinus × C. macrocephalus) | Kepala kecil, badan besar, FCR baik | Sterilitas parsial, variasi fenotip | Luas (Asia Tenggara) |
| Striped bass hybrid (M. saxatilis × M. chrysops) | Toleransi lingkungan, pertumbuhan cepat | Membutuhkan pakan khusus | Sedang (Amerika Utara) |
| Salmon Atlantik × S. trutta | Ketahanan penyakit | Steril, regulasi ketat | Terbatas (penelitian) |
| Koi × Karper liar | Ketahanan, adaptasi iklim | Ukuran tidak konsisten | Terbatas (ornamental) |

Tabel 7 menunjukkan berbagai kombinasi hibrida yang digunakan dalam akuakultur dunia, beserta keunggulan utama, kelemahan, dan tingkat adopsi komersialnya. Setiap kombinasi hibrida dihasilkan melalui persilangan terkontrol antara dua strain atau spesies yang berbeda untuk menggabungkan sifat unggul tertentu atau memanfaatkan fenomena heterosis (*hybrid vigor*).

Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa setiap kombinasi hibrida memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal keunggulan dan keterbatasan. Hibridisasi dalam akuakultur tidak hanya bertujuan meningkatkan pertumbuhan, tetapi juga mengoptimalkan nilai ekonomi, ketahanan lingkungan, serta kualitas produk. Namun, keberhasilan penerapan hibrida sangat bergantung pada kestabilan sifat genetik, kesesuaian dengan sistem budidaya, serta faktor regulasi dan pasar yang berlaku.

## 1. Definisi, Prinsip Genetik, dan Tujuan Hibridisasi

Hibridisasi merupakan teknik pemuliaan yang dilakukan melalui persilangan antara dua individu yang memiliki latar belakang genetik berbeda untuk menghasilkan keturunan hibrida dengan kombinasi sifat yang diharapkan. Persilangan dapat dilakukan antarstrain, antarpopulasi, antarras, atau bahkan antarspesies yang masih memiliki kompatibilitas reproduksi. Dalam akuakultur, hibridisasi digunakan sebagai salah satu strategi untuk meningkatkan performa produksi, memperbaiki karakter biologis, serta menggabungkan sifat unggul dari kedua tetua ke dalam satu keturunan.

Prinsip genetik hibridisasi didasarkan pada rekombinasi gen yang terjadi ketika materi genetik dari induk jantan dan induk betina bergabung selama proses fertilisasi. Keturunan yang dihasilkan akan mewarisi kombinasi alel dari kedua induknya sehingga memiliki susunan genetik yang berbeda dari masing-masing tetua. Kombinasi gen tersebut dapat menghasilkan variasi fenotip yang lebih luas dibandingkan populasi asal. Dalam beberapa kasus, interaksi antaralel yang berasal dari kedua tetua dapat meningkatkan ekspresi sifat tertentu sehingga performa keturunan menjadi lebih baik daripada kedua induknya.

Salah satu konsep penting dalam hibridisasi adalah *heterosis* atau *hybrid vigor*, yaitu fenomena ketika keturunan hibrida menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan rata-rata atau bahkan melebihi kedua induknya. Keunggulan tersebut dapat terlihat pada berbagai karakter, seperti laju pertumbuhan, efisiensi konversi pakan, ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap perubahan lingkungan, tingkat kelangsungan hidup, dan performa reproduksi. Fenomena *heterosis* terjadi karena adanya interaksi genetik yang menguntungkan, termasuk dominansi alel unggul dan berkurangnya pengaruh alel resesif yang merugikan. Selain *heterosis*, prinsip genetik lain yang mendasari hibridisasi adalah peningkatan keragaman genetik. Persilangan antara populasi yang berbeda memungkinkan terbentuknya kombinasi gen baru yang tidak ditemukan pada masing-masing populasi asal. Keragaman genetik yang lebih tinggi dapat meningkatkan kemampuan adaptasi keturunan terhadap berbagai kondisi lingkungan dan memberikan peluang lebih besar untuk memperoleh individu dengan karakter unggul.

Tujuan utama hibridisasi dalam akuakultur adalah menggabungkan sifat-sifat unggul dari dua populasi atau spesies yang

berbeda ke dalam satu individu. Sebagai contoh, satu spesies mungkin memiliki laju pertumbuhan yang cepat, sedangkan spesies lainnya memiliki ketahanan penyakit yang lebih baik. Melalui hibridisasi, diharapkan keturunan yang dihasilkan mampu mewarisi kedua sifat tersebut secara bersamaan. Dengan demikian, produktivitas budidaya dapat meningkat tanpa harus menunggu proses seleksi yang berlangsung dalam banyak generasi. Tujuan lain dari hibridisasi adalah meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi produksi. Banyak program budidaya memanfaatkan hibrida karena memiliki pertumbuhan yang lebih cepat, ukuran panen yang lebih besar, dan tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi dibandingkan populasi murni. Keunggulan tersebut dapat memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan melalui peningkatan hasil produksi dan pengurangan biaya operasional.

Hibridisasi juga digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit dan stres lingkungan. Kombinasi genetik dari dua tetua yang berbeda dapat menghasilkan keturunan dengan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan kualitas air, suhu, salinitas, atau tekanan penyakit. Karakter ini sangat penting dalam sistem budidaya modern yang sering menghadapi tantangan lingkungan dan risiko wabah penyakit. Selain tujuan produksi, hibridisasi dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan karakter khusus yang memiliki nilai komersial tinggi, seperti warna tubuh tertentu pada ikan hias, bentuk tubuh yang lebih menarik, atau komposisi jenis kelamin yang lebih menguntungkan bagi budidaya. Dalam beberapa kasus, hibridisasi juga digunakan untuk mendukung konservasi dan pengelolaan sumber daya genetik, meskipun penerapannya harus dilakukan secara hati-hati untuk menghindari hilangnya kemurnian genetik populasi asli.

## 2. Hibridisasi Intraspesifik dan Interspesifik

Hibridisasi dalam akuakultur dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu hibridisasi *intraspecific* dan hibridisasi *interspecific*. Klasifikasi ini didasarkan pada tingkat kekerabatan genetik antara induk yang digunakan dalam persilangan. Kedua jenis hibridisasi memiliki tujuan yang sama, yaitu menghasilkan keturunan dengan karakter yang lebih unggul dibandingkan tetuanya, namun berbeda dalam tingkat variasi genetik, peluang keberhasilan reproduksi, serta karakteristik keturunan yang dihasilkan.

Hibridisasi *intraspecific* merupakan persilangan antara individu-individu yang masih termasuk dalam spesies yang sama, tetapi berasal dari strain, populasi, ras, atau galur yang berbeda. Karena kedua induk masih berada dalam satu spesies, kompatibilitas reproduksinya umumnya tinggi sehingga proses fertilisasi, perkembangan embrio, dan kelangsungan hidup keturunan dapat berlangsung dengan baik. Tujuan utama hibridisasi *intraspecific* adalah menggabungkan sifat unggul yang terdapat pada populasi berbeda, seperti pertumbuhan cepat, ketahanan penyakit, efisiensi penggunaan pakan, atau kemampuan adaptasi terhadap lingkungan tertentu. Selain itu, metode ini sering digunakan untuk meningkatkan keragaman genetik dan mengurangi risiko *inbreeding* dalam populasi budidaya. Keuntungan utama hibridisasi *intraspecific* adalah tingginya tingkat keberhasilan reproduksi dan stabilitas genetik keturunan. Karena perbedaan genetik antara kedua tetua relatif tidak terlalu jauh, peluang munculnya gangguan perkembangan embrio atau infertilitas pada keturunan menjadi lebih rendah. Oleh sebab itu, hibridisasi jenis ini banyak diterapkan dalam program pemuliaan komersial yang bertujuan meningkatkan performa produksi tanpa menghadapi risiko biologis yang besar.

Sebaliknya, hibridisasi *interspecific* merupakan persilangan antara dua spesies yang berbeda tetapi masih memiliki hubungan kekerabatan yang cukup dekat sehingga memungkinkan terjadinya fertilisasi dan perkembangan embrio. Persilangan ini menghasilkan keturunan yang membawa kombinasi materi genetik dari dua spesies berbeda. Karena perbedaan genetik yang lebih besar dibandingkan hibridisasi *intraspecific*, keturunan yang dihasilkan sering menunjukkan karakter baru yang tidak ditemukan pada kedua spesies induknya. Hibridisasi *interspecific* umumnya dilakukan untuk memperoleh kombinasi sifat yang sulit dicapai melalui persilangan dalam satu spesies. Sebagai contoh, satu spesies mungkin memiliki laju pertumbuhan yang tinggi, sedangkan spesies lainnya memiliki ketahanan lingkungan yang lebih baik. Melalui persilangan antarpesies, diharapkan keturunan dapat mewarisi kedua karakter unggul tersebut. Dalam beberapa kasus, hibrida antarpesies juga menunjukkan fenomena *heterosis* yang lebih kuat sehingga menghasilkan performa pertumbuhan, ketahanan penyakit, atau produktivitas yang lebih tinggi dibandingkan kedua induknya.

Meskipun memiliki potensi yang besar, hibridisasi *interspecific* juga menghadapi berbagai tantangan biologis. Perbedaan jumlah kromosom, struktur genom, atau mekanisme reproduksi antara kedua spesies dapat menyebabkan rendahnya tingkat fertilisasi, tingginya kematian embrio, gangguan perkembangan, atau infertilitas pada keturunan. Pada beberapa kasus, keturunan hibrida mampu tumbuh dan berkembang secara normal tetapi tidak dapat menghasilkan gamet yang fungsional. Oleh karena itu, evaluasi genetik dan reproduktif menjadi langkah penting dalam pengembangan hibrida antarpesies.

Dari sudut pandang pemuliaan, hibridisasi *intraspecific* umumnya lebih mudah diterapkan untuk menghasilkan perbaikan genetik yang stabil dan berkelanjutan. Sementara itu, hibridisasi *interspecific* lebih sering digunakan untuk menciptakan kombinasi karakter baru atau memperoleh keunggulan produksi tertentu yang tidak tersedia dalam satu spesies. Kedua pendekatan tersebut memiliki peran penting dalam pengembangan akuakultur modern karena memberikan peluang untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi budidaya, ketahanan terhadap penyakit, dan kemampuan adaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan.

### 3. Contoh Hibrida Komersial dalam Akuakultur

Hibridisasi telah banyak diterapkan dalam akuakultur untuk menghasilkan strain atau populasi ikan yang memiliki performa lebih baik dibandingkan induknya. Melalui penggabungan karakter unggul dari dua populasi atau spesies yang berbeda, berbagai hibrida komersial berhasil dikembangkan untuk meningkatkan pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, toleransi lingkungan, efisiensi penggunaan pakan, dan produktivitas budidaya. Keberhasilan tersebut menjadikan hibridisasi sebagai salah satu strategi penting dalam program pemuliaan ikan modern.

Salah satu contoh hibrida komersial yang paling dikenal adalah hasil persilangan antara ikan lele Afrika (*Clarias gariepinus*) dan ikan lele Taiwan (*Clarias macrocephalus*). Hibrida ini dikembangkan untuk menggabungkan laju pertumbuhan cepat dan ketahanan lingkungan yang dimiliki lele Afrika dengan kualitas daging dan karakter reproduksi yang baik dari lele Taiwan. Keturunan yang dihasilkan menunjukkan pertumbuhan yang relatif cepat, tingkat kelangsungan hidup yang tinggi, serta kemampuan adaptasi yang baik terhadap berbagai kondisi budidaya

sehingga banyak digunakan dalam usaha pembesaran ikan lele di berbagai negara Asia.

Contoh lain adalah hibrida pada kelompok ikan nila yang dihasilkan melalui persilangan berbagai strain atau spesies dalam genus *Oreochromis*. Program hibridisasi pada ikan nila bertujuan menghasilkan keturunan dengan pertumbuhan lebih cepat, efisiensi pakan yang lebih baik, dan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap lingkungan budidaya. Beberapa hibrida nila juga menunjukkan proporsi ikan jantan yang lebih tinggi, yang menguntungkan karena ikan jantan umumnya memiliki laju pertumbuhan lebih cepat dibandingkan ikan betina. Dalam budidaya ikan patin, hibridisasi juga telah digunakan untuk menggabungkan sifat unggul dari beberapa spesies yang berbeda. Persilangan dilakukan untuk memperoleh kombinasi karakter seperti pertumbuhan cepat, ketahanan terhadap penyakit, dan kemampuan hidup pada kondisi lingkungan yang beragam. Hibrida yang dihasilkan sering menunjukkan performa produksi yang lebih baik dibandingkan salah satu atau kedua spesies tetuanya.

Pada kelompok ikan bass, salah satu contoh yang terkenal adalah hasil persilangan antara *striped bass* (*Morone saxatilis*) dan *white bass* (*Morone chrysops*). Hibrida ini banyak dibudidayakan karena memiliki laju pertumbuhan tinggi, toleransi lingkungan yang luas, serta kemampuan beradaptasi pada berbagai sistem budidaya. Selain itu, hibrida tersebut menunjukkan kualitas daging yang baik dan memiliki nilai ekonomi yang tinggi di pasar. Dalam budidaya ikan mas, berbagai program hibridisasi antarstrain telah dilakukan untuk meningkatkan produktivitas. Persilangan antara strain yang memiliki pertumbuhan cepat dengan strain yang memiliki daya tahan lingkungan yang baik dapat menghasilkan keturunan yang menunjukkan kombinasi kedua karakter tersebut. Pendekatan ini banyak digunakan untuk meningkatkan efisiensi produksi tanpa harus mengembangkan strain baru melalui seleksi jangka panjang.

Hibridisasi juga berkembang pesat dalam industri ikan hias. Berbagai varietas ikan hias komersial dihasilkan melalui persilangan antarstrain atau antarspesies untuk memperoleh kombinasi warna tubuh, bentuk sirip, pola sisik, dan karakter estetika yang unik. Hibrida-hibrida tersebut sering memiliki nilai jual yang tinggi karena menampilkan karakter fenotip yang tidak ditemukan pada populasi asalnya. Keberhasilan berbagai hibrida komersial tersebut umumnya berkaitan

dengan munculnya fenomena *heterosis* atau *hybrid vigor*, yaitu kondisi ketika keturunan hibrida memiliki performa yang lebih baik dibandingkan rata-rata kedua induknya. Keunggulan ini dapat berupa pertumbuhan lebih cepat, tingkat kelangsungan hidup lebih tinggi, ketahanan penyakit yang lebih baik, atau kemampuan adaptasi yang lebih luas terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu, hibridisasi terus menjadi salah satu pendekatan utama dalam pengembangan komoditas akuakultur yang lebih produktif dan kompetitif.

Contoh-contoh hibrida komersial dalam akuakultur menunjukkan bahwa penggabungan materi genetik dari populasi atau spesies yang berbeda dapat menghasilkan keturunan dengan karakter unggul yang bernilai ekonomi tinggi. Pemanfaatan hibrida pada ikan lele, nila, patin, bass, ikan mas, maupun ikan hias telah memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan produktivitas budidaya dan menjadi bagian penting dari perkembangan teknologi pemuliaan ikan modern.

## 4. Keunggulan, Keterbatasan, dan Implikasi Pemuliaan Hibrida

Hibridisasi memberikan berbagai keuntungan utama seperti peningkatan pertumbuhan, efisiensi pakan, ketahanan lingkungan, serta nilai pasar yang lebih tinggi. Namun, teknik ini juga memiliki keterbatasan, termasuk ketidakstabilan sifat pada generasi lanjut, variasi fenotip yang tinggi, serta potensi penurunan keseragaman genetik jika tidak dikelola dengan baik. Selain itu, beberapa hibrida bersifat steril sehingga tidak dapat digunakan untuk reproduksi lanjutan, yang berarti produksi benih harus selalu bergantung pada induk parental. Hal ini menimbulkan tantangan dalam skala industri, terutama dari sisi kontinuitas benih dan biaya produksi.

Implikasinya dalam program pemuliaan modern adalah bahwa hibridisasi tidak hanya dipandang sebagai metode peningkatan produksi jangka pendek, tetapi juga sebagai bagian dari strategi integratif yang harus dikombinasikan dengan seleksi genetik, pengelolaan broodstock, dan kontrol kualitas genetik untuk memastikan keberlanjutan sistem akuakultur yang efisien dan stabil.

## *B.* Strategi *Crossbreeding* dan *Inbreeding*

*Crossbreeding* (persilangan silang) adalah persilangan antara dua atau lebih strain atau populasi yang secara genetik berbeda, dengan tujuan meningkatkan variabilitas genetik, mengeksploitasi heterosis, atau menggabungkan gen-gen yang diinginkan dari masing-masing populasi parental. *Crossbreeding* yang dirancang dengan baik dapat meningkatkan performa produksi secara substansial, terutama untuk sifat-sifat yang berhubungan dengan fitness dan reproduksi (Falconer & Mackay, 1996).

*Inbreeding* (perkawinan sedarah), sebaliknya, adalah persilangan antara individu-individu yang memiliki hubungan kekerabatan lebih dekat dari rata-rata populasi. Meskipun *inbreeding* umumnya dipandang negatif karena memicu *inbreeding depression* (penurunan performa akibat peningkatan homozigositas), *inbreeding* yang terkontrol dalam program pemuliaan dapat digunakan secara strategis untuk memurnikan strain, memfiks alel yang diinginkan, atau membentuk *inbred lines* yang kemudian disilangkan untuk menghasilkan heterosis yang dapat diprediksi (Charlesworth & Willis, 2009).

Strategi persilangan sistematik seperti *rotational crossbreeding*, *terminal crossbreeding*, dan *reciprocal recurrent selection* (RRS) telah dikembangkan untuk mengoptimalkan manfaat heterosis sekaligus meminimalkan risiko *inbreeding* dalam program pemuliaan jangka panjang. Pemilihan strategi yang tepat bergantung pada tujuan pemuliaan, sumber daya yang tersedia, dan struktur industri yang ada (Gjedrem & Baranski, 2009).

### 1. Konsep dan Prinsip *Crossbreeding* dalam Akuakultur

*Crossbreeding* merupakan metode pemuliaan yang dilakukan melalui persilangan antara individu-individu yang berasal dari populasi, strain, galur, atau ras yang berbeda dalam satu spesies untuk menghasilkan keturunan dengan kombinasi sifat unggul dari kedua tetua. Dalam akuakultur, *crossbreeding* digunakan sebagai strategi untuk meningkatkan performa produksi, memperluas keragaman genetik, dan memanfaatkan keunggulan genetik yang terdapat pada masing-masing populasi. Berbeda dengan hibridisasi antarpesies, *crossbreeding* umumnya dilakukan antarindividu yang masih termasuk dalam spesies

yang sama sehingga kompatibilitas reproduksi dan stabilitas genetik keturunan relatif lebih tinggi.

Prinsip genetik utama *crossbreeding* didasarkan pada rekombinasi gen yang terjadi saat proses fertilisasi. Ketika dua individu dari populasi yang berbeda disilangkan, keturunannya akan mewarisi kombinasi alel dari kedua tetua. Kombinasi ini dapat menghasilkan variasi genetik yang lebih luas dibandingkan populasi asal sehingga meningkatkan peluang munculnya individu dengan karakter unggul. Selain itu, *crossbreeding* dapat mengurangi frekuensi alel resesif yang merugikan karena adanya kombinasi genetik yang lebih beragam.

Salah satu tujuan penting *crossbreeding* adalah memanfaatkan fenomena *heterosis* atau *hybrid vigor*. Fenomena ini terjadi ketika keturunan hasil persilangan menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan rata-rata kedua induknya. Keunggulan tersebut dapat terlihat pada karakter pertumbuhan, efisiensi penggunaan pakan, ketahanan terhadap penyakit, tingkat kelangsungan hidup, toleransi terhadap kondisi lingkungan yang kurang optimal, maupun performa reproduksi. Tingkat *heterosis* biasanya lebih tinggi apabila kedua populasi tetua memiliki perbedaan genetik yang cukup besar tetapi masih berada dalam batas kompatibilitas reproduksi yang baik.

Selain menghasilkan *heterosis*, *crossbreeding* juga berperan dalam meningkatkan keragaman genetik populasi budidaya. Dalam sistem budidaya yang menggunakan populasi tertutup selama banyak generasi, risiko terjadinya *inbreeding* atau perkawinan sekerabat dapat meningkat. Kondisi ini sering menyebabkan penurunan performa biologis, seperti pertumbuhan yang lambat, rendahnya tingkat kelangsungan hidup, dan menurunnya kemampuan reproduksi. Melalui *crossbreeding*, variasi genetik dapat ditingkatkan sehingga dampak negatif *inbreeding* dapat dikurangi.

Dalam praktik akuakultur, *crossbreeding* sering digunakan untuk menggabungkan sifat unggul yang terdapat pada dua strain berbeda. Sebagai contoh, satu strain mungkin memiliki laju pertumbuhan yang cepat, sedangkan strain lainnya memiliki ketahanan penyakit yang lebih baik. Dengan melakukan persilangan, diharapkan keturunan mampu mewarisi kedua karakter tersebut secara bersamaan. Pendekatan ini memungkinkan peningkatan produktivitas budidaya dalam waktu yang relatif lebih singkat dibandingkan program seleksi murni yang memerlukan banyak generasi.

Penerapan *crossbreeding* dapat dilakukan dalam berbagai pola persilangan, seperti persilangan sederhana antara dua strain, persilangan tiga galur, maupun sistem persilangan berulang yang melibatkan beberapa populasi. Pemilihan pola persilangan bergantung pada tujuan pemuliaan, karakter yang ingin ditingkatkan, serta sumber daya genetik yang tersedia. Evaluasi performa keturunan hasil persilangan menjadi langkah penting untuk menentukan apakah kombinasi genetik yang dihasilkan memberikan keuntungan biologis dan ekonomi yang nyata. Meskipun memiliki banyak manfaat, *crossbreeding* harus direncanakan secara cermat. Persilangan yang tidak terarah dapat menyebabkan hilangnya karakter unggul tertentu, berkurangnya keseragaman populasi, atau munculnya variasi fenotip yang terlalu besar sehingga menyulitkan manajemen budidaya. Oleh karena itu, pemilihan tetua harus didasarkan pada data genetik, performa produksi, dan tujuan pemuliaan yang jelas.

## 2. Konsep *Inbreeding* dan Dampaknya dalam Populasi Ikan

*Inbreeding* atau perkawinan sekerabat merupakan proses reproduksi yang terjadi antara individu-individu yang memiliki hubungan kekerabatan genetik lebih dekat dibandingkan rata-rata anggota populasi. Dalam program pemuliaan ikan, *inbreeding* dapat terjadi secara sengaja untuk mempertahankan karakter tertentu atau secara tidak sengaja akibat penggunaan jumlah induk yang terbatas dalam waktu yang lama. Kondisi ini menyebabkan meningkatnya peluang alel yang sama dari nenek moyang yang sama bertemu dalam satu individu, sehingga tingkat homozigositas dalam populasi menjadi lebih tinggi.

Secara genetik, *inbreeding* meningkatkan proporsi gen homozigot dan menurunkan proporsi gen heterozigot dalam populasi. Akibatnya, alel resesif yang sebelumnya tersembunyi dalam kondisi heterozigot menjadi lebih sering terekspresi. Jika alel resesif tersebut bersifat merugikan, maka dampaknya dapat terlihat dalam bentuk penurunan kualitas biologis individu maupun populasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, tingkat *inbreeding* yang tinggi sering dikaitkan dengan penurunan performa produksi dan kemampuan adaptasi ikan.

Salah satu dampak utama *inbreeding* adalah terjadinya *inbreeding depression*, yaitu penurunan performa biologis akibat meningkatnya homozigositas alel yang merugikan. Fenomena ini dapat

ditunjukkan melalui berkurangnya laju pertumbuhan, rendahnya efisiensi pemanfaatan pakan, menurunnya tingkat kelangsungan hidup, berkurangnya daya tahan terhadap penyakit, serta meningkatnya kerentanan terhadap perubahan lingkungan. Dalam sistem budidaya, kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan produktivitas dan keuntungan ekonomi.

Dampak *inbreeding* juga terlihat pada aspek reproduksi. Populasi yang mengalami tingkat *inbreeding* tinggi sering menunjukkan penurunan kualitas gonad, berkurangnya produksi telur dan sperma, rendahnya tingkat pembuahan, menurunnya daya tetas telur, serta meningkatnya mortalitas embrio dan larva. Gangguan reproduksi tersebut dapat menghambat keberhasilan program pembenihan dan mengurangi kemampuan populasi untuk mempertahankan keberlanjutannya dalam jangka panjang.

Selain memengaruhi performa individu, *inbreeding* juga menyebabkan berkurangnya keragaman genetik populasi. Keragaman genetik merupakan sumber utama kemampuan adaptasi terhadap perubahan lingkungan, tekanan penyakit, dan seleksi alam. Ketika variasi genetik menurun, kemampuan populasi untuk merespons tantangan lingkungan juga berkurang. Akibatnya, populasi menjadi lebih rentan terhadap wabah penyakit, perubahan kualitas air, maupun kondisi budidaya yang kurang optimal.

Dalam program pemuliaan, *inbreeding* terkadang dimanfaatkan secara terbatas untuk membentuk galur yang lebih seragam secara genetik dan mempertahankan karakter unggul tertentu. Namun, penerapan strategi ini harus dilakukan dengan sangat hati-hati karena peningkatan homozigositas yang berlebihan dapat menimbulkan dampak negatif yang lebih besar daripada manfaat yang diperoleh. Oleh sebab itu, program pemuliaan modern umumnya menerapkan pengelolaan perkawinan yang terencana untuk menjaga keseimbangan antara kemurnian genetik dan keberagaman genetik populasi.

Berbagai strategi dapat digunakan untuk mengurangi dampak *inbreeding*, seperti penggunaan jumlah induk yang memadai, pencatatan silsilah (*pedigree recording*), rotasi induk antarpopulasi, introduksi materi genetik baru, serta penerapan *crossbreeding* antarstrain yang memiliki hubungan kekerabatan jauh. Pendekatan-pendekatan tersebut bertujuan mempertahankan tingkat heterozigositas dan mencegah akumulasi alel merugikan dalam populasi budidaya.

## 3. Strategi Persilangan Sistematik dalam Program Pemuliaan

Strategi persilangan sistematik merupakan pendekatan pemuliaan yang dilakukan melalui pengaturan pola perkawinan secara terencana untuk memperoleh kombinasi genetik yang mampu meningkatkan performa populasi ikan budidaya. Berbeda dengan persilangan acak, strategi ini dirancang berdasarkan tujuan pemuliaan yang jelas, seperti meningkatkan laju pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, efisiensi pemanfaatan pakan, kualitas reproduksi, atau kemampuan adaptasi terhadap lingkungan tertentu. Dengan perencanaan yang baik, persilangan sistematik dapat memaksimalkan pemanfaatan keragaman genetik sekaligus mengurangi risiko penurunan kualitas akibat perkawinan sekerabat.

Prinsip utama strategi persilangan sistematik adalah mengombinasikan individu atau populasi yang memiliki karakter unggul yang saling melengkapi. Sebelum persilangan dilakukan, masing-masing populasi atau strain dievaluasi berdasarkan performa fenotipik dan informasi genetik yang tersedia. Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk menentukan kombinasi tetua yang berpotensi menghasilkan keturunan dengan karakter yang lebih baik dibandingkan populasi asal. Dengan demikian, persilangan tidak hanya bertujuan menciptakan variasi genetik, tetapi juga mengarahkan terbentuknya kombinasi sifat yang bernilai ekonomi tinggi.

Salah satu bentuk persilangan sistematik yang paling sederhana adalah persilangan dua galur (*two-line crossing*), yaitu perkawinan antara dua strain atau populasi yang berbeda. Metode ini banyak digunakan untuk memanfaatkan fenomena *heterosis* atau *hybrid vigor*, yaitu kondisi ketika keturunan menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan rata-rata kedua induknya. Keunggulan tersebut dapat berupa pertumbuhan yang lebih cepat, tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi, atau ketahanan penyakit yang lebih baik. Strategi yang lebih kompleks adalah persilangan tiga galur (*three-line crossing*). Dalam metode ini, keturunan hasil persilangan dua galur terlebih dahulu diproduksi, kemudian disilangkan kembali dengan galur ketiga yang memiliki karakter unggul tertentu. Tujuan pendekatan ini adalah menggabungkan keunggulan dari tiga sumber genetik sekaligus dan mempertahankan efek *heterosis* yang tinggi. Persilangan tiga galur sering digunakan ketika karakter unggul yang diinginkan tidak dapat diperoleh hanya melalui persilangan dua populasi.

Selain itu, terdapat sistem persilangan rotasional (*rotational crossing*), yaitu pola perkawinan yang melibatkan beberapa populasi atau galur secara bergantian pada setiap generasi. Sistem ini dirancang untuk mempertahankan tingkat heterozigositas yang tinggi sekaligus mengurangi akumulasi *inbreeding*. Dalam jangka panjang, persilangan rotasional dapat menjaga keseimbangan antara peningkatan performa produksi dan pelestarian keragaman genetik populasi. Strategi lain yang banyak digunakan adalah persilangan balik (*backcrossing*). Pada metode ini, keturunan hasil persilangan disilangkan kembali dengan salah satu tetuanya atau dengan populasi yang memiliki karakter tertentu. Tujuan utama *backcrossing* adalah memasukkan atau mempertahankan sifat unggul tertentu ke dalam populasi target tanpa menghilangkan sebagian besar karakter genetik yang telah dimiliki. Teknik ini sering digunakan dalam program pemuliaan yang berfokus pada perbaikan satu atau beberapa sifat spesifik.

Keberhasilan persilangan sistematik sangat bergantung pada pengelolaan data genetik dan reproduksi yang baik. Informasi mengenai silsilah, performa pertumbuhan, kualitas reproduksi, tingkat kelangsungan hidup, serta respons terhadap lingkungan perlu dicatat secara sistematis untuk mendukung pengambilan keputusan dalam setiap generasi. Dengan adanya data yang akurat, pemulia dapat mengevaluasi hasil persilangan dan menentukan strategi lanjutan yang paling efektif. Dalam akuakultur modern, strategi persilangan sistematik juga semakin didukung oleh teknologi genetika molekuler dan genomik. Penggunaan marka genetik memungkinkan identifikasi individu unggul secara lebih akurat, sementara analisis genom membantu memprediksi kombinasi persilangan yang memiliki peluang tinggi menghasilkan keturunan berkinerja superior. Integrasi antara metode persilangan konvensional dan teknologi genomik memberikan peluang yang lebih besar untuk mempercepat kemajuan genetik dalam populasi budidaya.

## 4. Keseimbangan antara *Crossbreeding* dan *Inbreeding* dalam Pemuliaan

Dalam sistem pemuliaan ikan modern, *crossbreeding* dan *inbreeding* tidak dipandang sebagai dua konsep yang saling bertentangan, tetapi sebagai dua alat yang saling melengkapi. *Crossbreeding* digunakan untuk meningkatkan performa produksi melalui heterosis, sementara *inbreeding* digunakan secara terkontrol

untuk membentuk dan mempertahankan stabilitas genetik dalam line tertentu.

Keseimbangan antara keduanya sangat penting untuk menjaga keberlanjutan program pemuliaan jangka panjang. Tanpa kontrol *inbreeding*, populasi dapat mengalami penurunan performa akibat depresi *inbreeding*. Sebaliknya, tanpa *crossbreeding*, potensi peningkatan performa melalui heterosis tidak dapat dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, program pemuliaan modern mengintegrasikan kedua pendekatan ini dalam desain *breeding system* yang terstruktur, adaptif, dan berbasis data genetik untuk menghasilkan strain ikan unggul yang stabil, produktif, dan berkelanjutan.

## C. *Hybrid Vigor* (Heterosis)

Heterosis atau *hybrid vigor* adalah fenomena di mana keturunan hibrida dari dua galur yang berbeda menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan rata-rata kedua galur parentalnya (*mid-parent heterosis*), atau bahkan melebihi galur parental yang lebih unggul (*best-parent heterosis*). Fenomena ini merupakan dasar biologis dari keberhasilan banyak program hibridisasi dalam pertanian dan akuakultur (Birchler *et al*., 2010).

Mekanisme genetik yang mendasari heterosis masih menjadi perdebatan ilmiah yang aktif, dengan tiga teori utama yang diajukan: (1) Teori Dominansi, yang menyatakan bahwa heterosis terjadi karena saling menutupinya alel-alel resesif merugikan oleh alel dominan pasangannya; (2) Teori *Overdominance*, yang menyatakan bahwa genotip heterozigot (Aa) secara inheren superior terhadap kedua homozigot (AA dan aa); dan (3) Epistasis, yang menekankan interaksi non-aditif antara gen-gen dari kedua galur parental (Charlesworth & Willis, 2009; Chen, 2013).

Dalam akuakultur, heterosis telah dilaporkan untuk berbagai sifat penting pada berbagai spesies. Hybrida lele Afrika (C. gariepinus × C. macrocephalus) menunjukkan heterosis yang sangat nyata untuk laju pertumbuhan (mencapai 20-40% di atas rata-rata parental), efisiensi pakan, dan ketahanan terhadap penyakit bakteri. Pemahaman tentang besar heterosis dan korelasi antara jarak genetik parental dengan besarnya heterosis menjadi informasi penting dalam perancangan program hibridisasi yang efisien (Astatkie *et al*., 2004).

## 1. Konsep Dasar dan Definisi Heterosis

*Heterosis* atau *hybrid vigor* merupakan fenomena genetik ketika keturunan hasil persilangan menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan rata-rata atau bahkan melebihi kedua induknya. Fenomena ini menjadi salah satu dasar penting dalam program pemuliaan karena memungkinkan diperolehnya individu dengan karakter unggul yang sulit dicapai melalui seleksi dalam satu populasi saja. Dalam akuakultur, *heterosis* sering dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas melalui perbaikan karakter ekonomi penting seperti pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pakan, kemampuan reproduksi, dan tingkat kelangsungan hidup. Secara genetik, *heterosis* muncul akibat kombinasi alel yang berbeda dari dua populasi atau strain yang disilangkan. Ketika individu yang memiliki latar belakang genetik berbeda dikawinkan, keturunannya cenderung memiliki tingkat heterozigositas yang lebih tinggi. Peningkatan heterozigositas ini dapat memperbaiki ekspresi sifat-sifat tertentu karena alel dominan yang menguntungkan mampu menutupi pengaruh alel resesif yang merugikan. Akibatnya, performa biologis keturunan menjadi lebih baik dibandingkan induknya.

Dalam akuakultur, *heterosis* dapat diamati pada berbagai karakter produksi. Salah satu karakter yang paling sering menunjukkan respons *heterosis* adalah laju pertumbuhan. Keturunan hasil persilangan sering memiliki pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan kedua populasi tetuanya. Selain itu, *heterosis* juga dapat meningkatkan efisiensi konversi pakan sehingga ikan mampu menghasilkan pertambahan bobot yang lebih besar dengan jumlah pakan yang sama. Keunggulan ini memberikan manfaat ekonomi yang signifikan bagi kegiatan budidaya. Fenomena *heterosis* juga banyak ditemukan pada karakter ketahanan terhadap penyakit dan stres lingkungan. Individu hasil persilangan sering memiliki sistem fisiologis yang lebih kuat sehingga mampu bertahan lebih baik terhadap infeksi patogen, perubahan suhu, fluktuasi kualitas air, maupun kondisi budidaya yang kurang ideal. Kemampuan adaptasi yang lebih baik ini menjadi salah satu alasan utama penggunaan persilangan dalam pengembangan strain unggul akuakultur.

Besarnya nilai *heterosis* dipengaruhi oleh tingkat perbedaan genetik antara kedua tetua yang disilangkan. Secara umum, semakin besar perbedaan genetik antarinduk, semakin besar peluang munculnya *heterosis*. Namun, perbedaan yang terlalu jauh juga dapat menimbulkan

masalah reproduksi atau ketidakcocokan genetik yang justru menurunkan kualitas keturunan. Oleh karena itu, pemilihan tetua yang tepat menjadi faktor penting dalam memperoleh manfaat *heterosis* yang optimal. Dalam program pemuliaan, *heterosis* sering dimanfaatkan melalui persilangan antarstrain, antarpopulasi, atau antarspesies yang masih memiliki kompatibilitas reproduksi. Keturunan generasi pertama hasil persilangan biasanya menunjukkan efek *heterosis* yang paling tinggi. Namun, apabila keturunan tersebut dikawinkan kembali secara acak pada generasi berikutnya, tingkat heterozigositas dapat menurun sehingga efek *heterosis* juga berkurang. Oleh sebab itu, banyak program produksi komersial mempertahankan persilangan terkontrol untuk menghasilkan keturunan generasi pertama secara berkelanjutan.

## 2. Teori Genetik Penyebab Heterosis

Mekanisme genetik yang mendasari heterosis masih menjadi topik kajian ilmiah yang kompleks, dan hingga saat ini terdapat tiga teori utama yang digunakan untuk menjelaskannya. Teori pertama adalah teori dominansi, yang menyatakan bahwa heterosis terjadi karena alel dominan dari satu parental mampu menutupi efek alel resesif yang merugikan dari parental lainnya. Dengan demikian, kombinasi heterozigot akan memiliki jumlah alel deleterius yang lebih rendah dibandingkan masing-masing parental.

Teori kedua adalah overdominance, yang menyatakan bahwa genotipe heterozigot (Aa) memiliki keunggulan intrinsik dibandingkan kedua homozigot (AA dan aa). Dalam model ini, heterozigositas itu sendiri memberikan keuntungan fisiologis atau metabolik yang meningkatkan performa individu. Teori ketiga adalah epistasis, yang menekankan adanya interaksi non-aditif antar gen dari kedua parental. Kombinasi gen tertentu dapat menghasilkan efek sinergis yang meningkatkan performa, atau sebaliknya menghasilkan ketidaksesuaian genetik yang memengaruhi ekspresi sifat secara keseluruhan. Ketiga teori ini kemungkinan besar bekerja secara simultan dalam sistem biologis yang kompleks seperti ikan budidaya.

## 3. Aplikasi Heterosis dalam Akuakultur dan Implikasinya

Dalam akuakultur, heterosis telah dimanfaatkan secara luas untuk meningkatkan produktivitas berbagai spesies ikan komersial. Salah satu contoh yang paling terkenal adalah hibrida lele Afrika hasil

persilangan Clarias gariepinus dan Clarias macrocephalus, yang menunjukkan peningkatan laju pertumbuhan sekitar 20–40% dibandingkan rata-rata parentalnya, disertai peningkatan efisiensi pakan dan ketahanan terhadap penyakit bakteri. Selain itu, heterosis juga dilaporkan pada berbagai spesies lain seperti nila, karper, dan beberapa ikan laut budidaya. Besarnya efek heterosis sering kali berkorelasi dengan jarak genetik antar parental, sehingga informasi genetika molekuler seperti marker SNP dan analisis genomik menjadi sangat penting dalam merancang kombinasi persilangan yang optimal.

Implikasi praktis dari fenomena ini adalah bahwa program hibridisasi dalam akuakultur tidak hanya bertujuan menggabungkan sifat unggul, tetapi juga secara strategis memaksimalkan heterosis untuk meningkatkan performa produksi. Oleh karena itu, pemahaman mengenai mekanisme, besaran, dan prediksi heterosis menjadi komponen penting dalam desain program pemuliaan modern yang berbasis data genetik dan genomik.

## D. Pembentukan Strain Tahan Penyakit

Pembentukan strain ikan yang resistan terhadap penyakit merupakan salah satu tujuan pemuliaan yang paling strategis mengingat dampak ekonomi wabah penyakit yang sangat besar pada industri akuakultur. Pendekatan pemuliaan untuk ketahanan penyakit membutuhkan metodologi yang unik karena sifat ini tidak dapat diukur secara langsung pada individu yang akan dijadikan induk individu yang 'bertahan' dalam uji tantang (*challenge test*) tidak dapat lagi digunakan sebagai induk (Kjøglum *et al*., 2008).

Protokol *challenge test* yang terstandarisasi merupakan komponen kritis dalam program seleksi ketahanan penyakit. Uji tantang dilakukan dengan mengekspos ikan secara terkontrol terhadap patogen target (bakteri, virus, atau parasit) pada konsentrasi infektif yang telah ditentukan, kemudian mencatat survival selama periode pengamatan tertentu. Data survival dari saudara kandung (*sibling*) individu yang diuji kemudian digunakan untuk mengestimasi nilai pemuliaan keluarga (*family EBV*) untuk ketahanan penyakit (Gjedrem, 2012).

Pendekatan genomik telah membuka kemungkinan identifikasi individu yang membawa alel-alel yang berhubungan dengan ketahanan

penyakit tanpa perlu melakukan uji tantang yang destruktif. SNP yang terkait dengan *Quantitative Resistance Loci* (QRL) atau wilayah *Major Histocompatibility Complex* (MHC) dapat digunakan sebagai marker seleksi dalam program MAS atau GS untuk ketahanan penyakit (Palaiokostas *et al*., 2016; Kjøglum *et al*., 2008).

## 1. Konsep dan Signifikansi Seleksi Ketahanan Penyakit

Seleksi ketahanan penyakit merupakan salah satu pendekatan penting dalam program pemuliaan ikan yang bertujuan meningkatkan kemampuan ikan untuk bertahan terhadap infeksi yang disebabkan oleh bakteri, virus, parasit, maupun jamur. Ketahanan penyakit mengacu pada kemampuan individu untuk mencegah infeksi, mengurangi tingkat keparahan penyakit, atau mempertahankan tingkat kelangsungan hidup yang tinggi ketika terpapar patogen. Karakter ini memiliki nilai ekonomi yang sangat penting karena penyakit merupakan salah satu penyebab utama kerugian dalam akuakultur melalui peningkatan mortalitas, penurunan laju pertumbuhan, penurunan kualitas hasil panen, serta meningkatnya biaya pengendalian penyakit. Oleh karena itu, peningkatan ketahanan penyakit menjadi salah satu target utama dalam pengembangan strain ikan unggul.

Secara genetik, ketahanan penyakit termasuk sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen dengan kontribusi yang berbeda terhadap respons kekebalan tubuh. Selain faktor genetik, karakter ini juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, kualitas air, kepadatan tebar, ketersediaan pakan, dan tingkat stres yang dialami ikan. Dalam program pemuliaan, seleksi dilakukan dengan mengidentifikasi individu atau keluarga yang menunjukkan kemampuan bertahan hidup lebih baik ketika menghadapi serangan penyakit tertentu. Penilaian ketahanan biasanya dilakukan melalui *challenge test*, yaitu pengujian terkontrol dengan memaparkan ikan pada patogen tertentu untuk mengukur tingkat infeksi, respons imun, atau kelangsungan hidup.

Perkembangan teknologi genetika molekuler telah meningkatkan efektivitas seleksi ketahanan penyakit melalui pemanfaatan *marker-assisted selection* dan *genomic selection*. Pada pendekatan *marker-assisted selection*, proses seleksi dilakukan berdasarkan keberadaan penanda asam deoksiribonukleat yang berhubungan dengan gen pengendali ketahanan terhadap penyakit tertentu. Sementara itu, *genomic selection* menggunakan informasi dari ribuan penanda genetik

yang tersebar di seluruh genom untuk memprediksi nilai genetik individu secara lebih akurat. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi calon induk unggul sejak usia dini tanpa harus menunggu munculnya gejala penyakit atau melakukan pengujian dalam jumlah besar.

Signifikansi seleksi ketahanan penyakit sangat besar bagi keberlanjutan industri akuakultur. Peningkatan ketahanan genetik dapat menurunkan tingkat kematian, meningkatkan produktivitas, serta mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan antibiotik dan bahan kimia. Selain itu, populasi ikan yang lebih tahan penyakit mampu menjaga stabilitas produksi dan mengurangi risiko kerugian akibat wabah penyakit yang sering terjadi pada sistem budidaya intensif. Dengan demikian, seleksi ketahanan penyakit tidak hanya memberikan manfaat ekonomi bagi pembudidaya, tetapi juga mendukung praktik akuakultur yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Berbagai program pemuliaan di dunia telah menunjukkan keberhasilan penerapan seleksi ketahanan penyakit. Pada ikan salmon Atlantik, seleksi genetik berhasil meningkatkan ketahanan terhadap *Infectious Pancreatic Necrosis* (IPN) dan penyakit bakterial tertentu. Pada ikan nila, program pemuliaan telah dikembangkan untuk meningkatkan resistensi terhadap infeksi *Streptococcus agalactiae*, sementara pada udang vaname seleksi diarahkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap *White Spot Syndrome Virus* (WSSV) dan penyakit lainnya. Keberhasilan tersebut menunjukkan bahwa ketahanan penyakit memiliki komponen genetik yang cukup besar sehingga dapat diperbaiki secara efektif melalui program seleksi.

## 2. Protokol *Challenge Test* dan Evaluasi Genetik

*Challenge test* merupakan metode yang digunakan untuk mengukur tingkat ketahanan ikan terhadap penyakit melalui paparan patogen secara terkontrol. Tujuan utama metode ini adalah memperoleh data fenotipik yang akurat mengenai respons individu atau keluarga ikan terhadap infeksi tertentu. Dalam pelaksanaannya, ikan yang akan diuji dipelihara pada kondisi lingkungan yang seragam, kemudian dipaparkan pada patogen melalui injeksi, perendaman, atau kontak langsung dengan ikan yang telah terinfeksi. Selama periode pengujian, berbagai parameter diamati, seperti tingkat mortalitas, waktu bertahan hidup, tingkat infeksi, perubahan perilaku, serta respons fisiologis yang berkaitan dengan

sistem kekebalan tubuh. Standarisasi prosedur menjadi faktor penting untuk memastikan bahwa perbedaan respons yang diamati benar-benar mencerminkan perbedaan genetik, bukan akibat variasi lingkungan.

Tahapan pelaksanaan *challenge test* dimulai dengan persiapan populasi uji yang memiliki identitas genetik yang jelas, baik berdasarkan individu maupun keluarga. Selanjutnya dilakukan kultur dan verifikasi patogen yang akan digunakan agar tingkat virulensinya konsisten selama pengujian. Setelah proses infeksi dilakukan, ikan dipelihara dalam fasilitas dengan tingkat biosekuriti yang tinggi untuk mencegah penyebaran patogen ke lingkungan luar. Data yang dikumpulkan selama pengujian kemudian dianalisis untuk menentukan tingkat ketahanan masing-masing individu atau kelompok. Individu yang mampu bertahan hidup lebih lama atau menunjukkan tingkat infeksi yang lebih rendah umumnya dianggap memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap penyakit yang diuji.

Data hasil *challenge test* selanjutnya digunakan dalam evaluasi genetik untuk mengestimasi parameter pemuliaan yang berkaitan dengan ketahanan penyakit. Salah satu parameter yang paling penting adalah heritabilitas, yaitu proporsi variasi fenotipik yang disebabkan oleh faktor genetik aditif. Nilai heritabilitas yang tinggi menunjukkan bahwa karakter ketahanan penyakit dapat diwariskan secara efektif kepada generasi berikutnya sehingga seleksi akan memberikan kemajuan genetik yang lebih cepat. Selain heritabilitas, evaluasi genetik juga mencakup estimasi nilai pemuliaan individu, korelasi genetik dengan karakter ekonomi lainnya, serta identifikasi keluarga yang memiliki performa terbaik. Analisis ini umumnya dilakukan menggunakan model statistik yang menggabungkan informasi fenotipik, silsilah, dan data genomik.

Perkembangan teknologi genetika molekuler semakin meningkatkan akurasi evaluasi genetik melalui pemanfaatan *marker-assisted selection* dan *genomic selection*. Dengan menggunakan informasi penanda genetik yang tersebar di seluruh genom, peneliti dapat memprediksi potensi ketahanan penyakit tanpa harus menguji seluruh individu melalui *challenge test*. Pendekatan ini mampu mempercepat proses seleksi, mengurangi biaya pengujian, dan meningkatkan ketepatan dalam memilih calon induk unggul. Oleh karena itu, integrasi antara *challenge test* yang terstandarisasi dan evaluasi genetik berbasis genomik menjadi fondasi utama dalam program pemuliaan modern

untuk menghasilkan populasi ikan yang lebih tahan penyakit, produktif, dan berkelanjutan.

### 3. Pendekatan Genomik dalam Seleksi Ketahanan Penyakit

Pendekatan *genomic* merupakan salah satu inovasi terpenting dalam pemuliaan ikan modern yang memungkinkan proses seleksi dilakukan berdasarkan informasi genom secara menyeluruh. Dalam konteks ketahanan penyakit, pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi variasi genetik yang berhubungan dengan kemampuan ikan dalam melawan infeksi patogen. Berbeda dengan seleksi konvensional yang hanya mengandalkan pengamatan fenotipik, pendekatan *genomic* memanfaatkan ribuan penanda asam deoksiribonukleat yang tersebar di seluruh genom sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai potensi genetik individu. Teknologi ini menjadi sangat penting karena ketahanan penyakit umumnya merupakan sifat kompleks yang dikendalikan oleh banyak gen dengan efek yang relatif kecil.

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah *marker-assisted selection*, yaitu metode seleksi yang memanfaatkan penanda genetik yang berasosiasi dengan gen atau wilayah genom tertentu yang mengendalikan ketahanan penyakit. Melalui pendekatan ini, individu yang membawa alel unggul dapat diidentifikasi sejak fase awal kehidupan tanpa harus menunggu munculnya gejala penyakit atau melakukan pengujian infeksi dalam skala besar. Keberhasilan metode ini bergantung pada kemampuan peneliti dalam menemukan hubungan yang kuat antara penanda genetik dan karakter ketahanan yang menjadi target seleksi. Oleh karena itu, identifikasi *quantitative trait loci* yang berkaitan dengan respons imun menjadi langkah penting dalam pengembangan program pemuliaan berbasis genomik.

Perkembangan lebih lanjut menghasilkan metode *genomic selection* yang memanfaatkan informasi dari seluruh genom untuk memprediksi nilai genetik individu. Dalam pendekatan ini, ribuan hingga jutaan penanda genetik dianalisis secara simultan untuk menghitung nilai pemuliaan genomik yang mencerminkan potensi ketahanan penyakit suatu individu. Keunggulan utama metode ini adalah kemampuannya menangkap pengaruh banyak gen sekaligus sehingga tingkat akurasi prediksi menjadi lebih tinggi dibandingkan metode seleksi berbasis penanda tunggal. Selain itu, *genomic selection*

memungkinkan seleksi dilakukan pada usia yang sangat muda, sehingga dapat mempercepat interval generasi dan meningkatkan laju kemajuan genetik dalam program pemuliaan.

Penerapan pendekatan *genomic* dalam seleksi ketahanan penyakit memberikan berbagai manfaat bagi industri akuakultur, antara lain meningkatkan efisiensi seleksi, mengurangi biaya pengujian penyakit, serta menghasilkan populasi ikan yang lebih sehat dan produktif. Integrasi data genomik dengan hasil *challenge test*, informasi silsilah, dan data fenotipik mampu menghasilkan estimasi nilai pemuliaan yang lebih akurat dibandingkan penggunaan satu sumber data saja. Dengan semakin menurunnya biaya teknologi pengurutan genom dan analisis genetik, pendekatan *genomic* diperkirakan akan menjadi standar utama dalam program pemuliaan masa depan untuk menghasilkan strain ikan yang memiliki ketahanan penyakit tinggi, produktivitas optimal, dan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan lingkungan budidaya.

## E. Risiko Genetik pada Hibridasi

Hibridisasi merupakan salah satu metode pemuliaan yang banyak digunakan untuk menggabungkan sifat unggul dari dua populasi atau spesies yang berbeda. Meskipun dapat menghasilkan keturunan dengan performa yang lebih baik melalui fenomena *heterosis*, penerapan hibridisasi juga memiliki berbagai risiko genetik yang perlu diperhatikan. Risiko-risiko tersebut dapat memengaruhi stabilitas genetik populasi budidaya, kualitas keturunan, serta keberlanjutan sumber daya genetik dalam jangka panjang. Oleh karena itu, program hibridisasi harus dirancang dan dievaluasi secara hati-hati agar manfaat yang diperoleh lebih besar daripada potensi dampak negatifnya.

Salah satu risiko utama hibridisasi adalah terjadinya ketidakcocokan genetik (*genetic incompatibility*) antara kedua tetua yang disilangkan. Perbedaan struktur kromosom, susunan genom, atau mekanisme regulasi gen dapat menyebabkan gangguan perkembangan embrio, rendahnya tingkat penetasan telur, tingginya mortalitas larva, atau menurunnya performa fisiologis keturunan. Risiko ini umumnya lebih besar pada hibridisasi antarpesies dibandingkan persilangan dalam satu spesies karena tingkat perbedaan genetik yang lebih tinggi (Reed & Frankham, 2003). Selain itu, risiko utama adalah *introgression* genetik

perembesan gen-gen dari ikan hibrida atau domestikasi ke dalam populasi ikan liar melalui perkawinan dengan individu yang lolos dari fasilitas budidaya. *Introgression* dapat mengubah struktur genetik populasi liar dan berpotensi menurunkan ketahanan populasi liar terhadap tekanan lingkungan (Muhlfeld *et al*., 2009).

Risiko lain yang sering ditemukan adalah infertilitas atau penurunan kemampuan reproduksi pada keturunan hibrida. Pada beberapa kasus, hibrida mampu tumbuh dan berkembang secara normal tetapi mengalami gangguan dalam pembentukan gamet akibat ketidaksesuaian proses pembelahan kromosom selama *meiosis*. Akibatnya, individu hibrida menjadi steril atau memiliki tingkat fertilitas yang sangat rendah. Kondisi ini dapat membatasi pemanfaatan hibrida untuk program pemuliaan jangka panjang dan menyebabkan ketergantungan pada produksi hibrida baru dari tetua asal.

Hibridisasi juga dapat menyebabkan *outbreeding depression*, yaitu penurunan performa biologis akibat persilangan antara populasi yang memiliki perbedaan genetik terlalu besar. Fenomena ini terjadi ketika kombinasi gen yang telah beradaptasi dengan baik pada masing-masing populasi tetua menjadi terganggu setelah proses persilangan. Akibatnya, keturunan dapat menunjukkan pertumbuhan yang lebih rendah, daya tahan yang menurun, atau kemampuan adaptasi yang lebih buruk dibandingkan populasi asal. Dengan kata lain, tidak semua persilangan menghasilkan *heterosis*, dan pada kondisi tertentu justru dapat menurunkan kualitas keturunan.

Risiko berikutnya adalah hilangnya karakter genetik unggul yang telah terbentuk dalam populasi murni. Ketika dua populasi disilangkan, kombinasi gen baru yang terbentuk dapat menyebabkan berkurangnya ekspresi karakter tertentu yang sebelumnya menjadi keunggulan masing-masing tetua. Jika program hibridisasi tidak dikelola dengan baik, karakter penting yang telah diperoleh melalui proses seleksi selama banyak generasi dapat hilang atau mengalami penurunan frekuensi dalam populasi.

Dari perspektif konservasi genetik, salah satu risiko yang paling serius adalah pencemaran genetik (*genetic introgression*). Risiko ini terjadi apabila individu hibrida terlepas ke lingkungan alami dan melakukan reproduksi dengan populasi liar. Proses tersebut dapat menyebabkan masuknya materi genetik asing ke dalam populasi alami sehingga mengubah struktur genetik populasi asli. Dalam jangka

panjang, kondisi ini dapat mengurangi kemurnian genetik, menurunkan adaptasi lokal yang telah terbentuk secara alami, dan bahkan mengancam kelestarian spesies atau populasi asli.

Hibridisasi yang dilakukan secara luas juga berpotensi mengurangi keragaman genetik apabila hanya sejumlah kecil kombinasi tetua yang digunakan secara berulang. Ketergantungan pada beberapa strain atau hibrida unggul dapat menyebabkan penyempitan basis genetik populasi budidaya. Keragaman genetik yang rendah akan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit, perubahan lingkungan, dan tekanan seleksi lainnya sehingga mengurangi kemampuan adaptasi populasi pada masa depan.

Untuk meminimalkan berbagai risiko tersebut, program hibridisasi perlu didukung oleh evaluasi genetik yang komprehensif, pengelolaan induk yang baik, serta pemantauan performa keturunan dalam beberapa generasi. Penggunaan marka molekuler, analisis genomik, dan pencatatan silsilah dapat membantu mengidentifikasi kombinasi persilangan yang aman dan efektif. Selain itu, langkah-langkah biosekuriti perlu diterapkan untuk mencegah pelepasan hibrida ke lingkungan alami yang dapat mengganggu keberlanjutan sumber daya genetik lokal.

Manajemen risiko genetik dalam program hibridisasi melibatkan beberapa strategi: (1) penggunaan ikan steril (triploid) untuk mencegah introgression ke populasi liar, (2) pemeliharaan bank gen (gene bank) dari strain-strain parental asli, (3) monitoring genetik reguler terhadap populasi liar di sekitar fasilitas budidaya, dan (4) implementasi protokol biosecurity yang ketat untuk mencegah pelepasan ikan tidak disengaja (Van Eenennaam *et al*., 2019).



# BAB VI
# BIOTEKNOLOGI MOLEKULER DALAM PEMULIAAN IKAN

## A. *Polymerase Chain Reaction* dan Analisis DNA pada Ikan

*Polymerase Chain Reaction* (PCR) merupakan salah satu teknik biologi molekuler yang paling revolusioner dan telah menjadi tulang punggung hampir seluruh aplikasi analisis DNA modern. Dikembangkan oleh Kary Mullis pada tahun 1983 (yang kemudian meraih Nobel Kimia 1993), PCR memungkinkan amplifikasi (perbanyakan) fragmen DNA spesifik secara eksponensial dalam tabung reaksi menggunakan enzim DNA polimerase tahan panas (*Taq polymerase*) dan dua primer oligonukleotida pendek yang mengapit region target (Mullis *et al*., 1986; Garibyan & Avashia, 2013).

Dalam konteks pemuliaan ikan, PCR digunakan dalam berbagai aplikasi: (1) *genotipasi marker* SSR/*microsatellite* untuk analisis keragaman genetik dan *parentage assignment*, (2) genotipasi SNP menggunakan teknik KASP (*Kompetitif Allele-Specific* PCR) atau HRM (*High Resolution Melting*), (3) deteksi patogen dalam sampel jaringan ikan (PCR diagnostik), (4) verifikasi jenis kelamin genetik menggunakan *marker sex-linked*, dan (5) amplifikasi gen target sebelum *sequencing* atau *kloning* (Liu & Cordes, 2004).

Inovasi terkini dalam teknologi PCR yang relevan untuk akuakultur mencakup: digital PCR (dPCR) untuk kuantifikasi absolut DNA target dengan presisi tinggi, droplet digital PCR (ddPCR) untuk deteksi varian alel yang jarang, dan multipleks PCR yang

memungkinkan amplifikasi simultan banyak lokus dalam satu reaksi sangat efisien untuk genotipasi banyak marker secara bersamaan (Hindson *et al*., 2011).

Tabel 8. Berbagai Teknik PCR dan Aplikasinya dalam Bioteknologi Akuakultur

| Teknik PCR | Prinsip | Aplikasi Akuakultur | Keunggulan |
|---|---|---|---|
| PCR Konvensional | Amplifikasi standar + gel elektroforesis | Genotipasi SSR, deteksi gen | Murah, sederhana |
| Real-time PCR (qPCR) | Kuantifikasi selama siklus PCR | Ekspresi gen, kuantifikasi patogen | Kuantitatif, cepat |
| Multipleks PCR | Banyak primer dalam 1 reaksi | Panel parentage assignment | Efisien, ekonomis |
| Digital PCR (dPCR) | Partisi ribuan reaksi kecil | Deteksi mutasi langka, GMO | Akurasi absolut |
| KASP PCR | Allele-specific fluorescence | Genotipasi SNP skala besar | High-throughput, akurat |
| Loop-mediated (LAMP) | Amplifikasi isotermal | Diagnostik lapangan (POC) | Tanpa PCR machine |

Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa teknologi PCR telah berkembang dari metode kualitatif sederhana menjadi sistem analisis molekuler yang sangat kompleks, presisi, dan beragam fungsinya. Dalam akuakultur modern, pemilihan teknik PCR sangat bergantung pada tujuan analisis, mulai dari identifikasi genetik dasar, analisis ekspresi gen, hingga seleksi genomik skala besar dan diagnostik penyakit secara cepat. Integrasi berbagai teknik PCR ini telah mempercepat kemajuan bioteknologi perikanan secara signifikan, terutama dalam program pemuliaan, konservasi, dan pengendalian penyakit ikan budidaya.

## 1. Prinsip Dasar DNA *Sequencing* dan Evolusi Teknologinya

*DNA sequencing* adalah teknik untuk menentukan urutan nukleotida, yaitu adenin, timin, guanin, dan sitosin, dalam suatu fragmen asam deoksiribonukleat. Teknologi ini merupakan fondasi utama genomik modern karena memungkinkan identifikasi variasi genetik secara langsung pada tingkat basa. Dengan mengetahui susunan nukleotida secara tepat, peneliti dapat memahami struktur gen, mengidentifikasi mutasi, serta mempelajari hubungan antara variasi genetik dan karakter fenotipik yang penting. Informasi yang dihasilkan dari *DNA sequencing* menjadi dasar bagi berbagai aplikasi biologi molekuler, mulai dari pemetaan genom hingga pengembangan program pemuliaan berbasis genomik.

Perkembangan teknologi *DNA sequencing* diawali oleh metode *Sanger sequencing* atau metode penghentian rantai yang diperkenalkan oleh Frederick Sanger pada akhir tahun 1970-an. Metode ini menggunakan nukleotida khusus yang menghentikan proses sintesis asam deoksiribonukleat sehingga urutan basa dapat ditentukan secara bertahap. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang tinggi, metode ini relatif lambat dan memiliki kapasitas analisis yang terbatas. Seiring meningkatnya kebutuhan akan data genom dalam jumlah besar, teknologi ini kemudian berkembang menjadi *Next Generation Sequencing* yang mampu membaca jutaan fragmen asam deoksiribonukleat secara paralel dalam satu proses, sehingga menghasilkan data genom dalam jumlah sangat besar dengan biaya dan waktu yang jauh lebih efisien (Metzker, 2010).

Kemajuan berikutnya ditandai dengan munculnya teknologi generasi ketiga atau *long-read sequencing* yang memungkinkan pembacaan fragmen asam deoksiribonukleat berukuran sangat panjang secara langsung. Teknologi ini memberikan kemampuan yang lebih baik dalam menganalisis struktur genom yang kompleks, mendeteksi variasi struktural, serta menyusun genom dengan tingkat kelengkapan yang lebih tinggi dibandingkan teknologi sebelumnya. Kombinasi teknologi generasi kedua dan generasi ketiga telah memperluas cakupan penelitian genomik dan memungkinkan eksplorasi variasi genetik secara lebih mendalam pada berbagai spesies.

Dalam bidang akuakultur, *DNA sequencing* digunakan untuk mengidentifikasi variasi genetik, membangun genom referensi spesies budidaya, serta menemukan gen yang berhubungan dengan sifat-sifat

ekonomis seperti pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, reproduksi, dan efisiensi pemanfaatan pakan. Peralihan dari teknologi pengurutan konvensional menuju *Next Generation Sequencing* telah mengubah paradigma pemuliaan dari pendekatan yang hanya memanfaatkan sejumlah kecil penanda genetik menjadi pendekatan berbasis genom secara menyeluruh. Perubahan ini memungkinkan identifikasi gen unggul dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi sehingga mempercepat pengembangan strain ikan yang produktif, tahan penyakit, dan memiliki performa budidaya yang lebih baik. (Metzker, 2010).

## 2. *Next Generation Sequencing* (NGS) dan Aplikasinya pada Akuakultur

*Next Generation Sequencing* merupakan teknologi pengurutan asam deoksiribonukleat berkapasitas tinggi yang memungkinkan analisis jutaan hingga miliaran fragmen asam deoksiribonukleat secara paralel dalam satu proses pengujian. Teknologi ini dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan metode *Sanger sequencing* yang memiliki kapasitas analisis relatif rendah dan membutuhkan waktu yang lebih lama. Dengan kemampuan menghasilkan data genom dalam jumlah besar secara cepat dan efisien, *Next Generation Sequencing* telah menjadi salah satu teknologi utama dalam penelitian genomik modern. Pemanfaatannya memungkinkan identifikasi variasi genetik secara lebih komprehensif serta mendukung analisis genom pada berbagai organisme, termasuk spesies akuakultur (Goodwin et al., 2016).

Berbagai platform *Next Generation Sequencing* telah dikembangkan dengan karakteristik yang berbeda. Platform *Illumina sequencing* merupakan teknologi yang paling banyak digunakan karena memiliki tingkat akurasi tinggi dan biaya analisis yang relatif efisien untuk menghasilkan data dalam jumlah besar. Selain itu, terdapat platform *Ion Torrent* yang mendeteksi perubahan ion hidrogen selama proses sintesis asam deoksiribonukleat. Teknologi lain seperti *Pacific Biosciences* dan *Oxford Nanopore* termasuk dalam kategori *long-read sequencing* yang mampu menghasilkan pembacaan fragmen asam deoksiribonukleat berukuran panjang, sehingga sangat bermanfaat untuk analisis struktur genom yang kompleks dan penyusunan genom referensi dengan tingkat kelengkapan yang lebih tinggi. Setiap platform memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri dalam aspek akurasi, panjang

pembacaan, kecepatan analisis, serta biaya operasional (Goodwin et al., 2016).

Dalam bidang akuakultur, *Next Generation Sequencing* memiliki berbagai aplikasi strategis yang mendukung penelitian dan program pemuliaan. Salah satu aplikasi utamanya adalah pembangunan genom referensi bagi spesies ikan budidaya yang menjadi dasar dalam berbagai studi genetika dan genomik. Teknologi ini juga digunakan untuk mengidentifikasi ribuan hingga jutaan polimorfisme nukleotida tunggal yang dapat dimanfaatkan sebagai penanda genetik dalam program seleksi berbasis genom. Selain itu, pendekatan *RNA sequencing* memungkinkan analisis ekspresi gen pada kondisi stres lingkungan, infeksi penyakit, maupun fase perkembangan tertentu sehingga memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme biologis yang mendasari berbagai karakter penting.

Aplikasi lain yang semakin berkembang adalah studi metagenomik untuk menganalisis komunitas mikroorganisme yang hidup di lingkungan budidaya maupun di dalam tubuh ikan. Informasi ini sangat penting untuk memahami hubungan antara mikrobiota, kesehatan ikan, kualitas lingkungan, dan produktivitas budidaya. Data yang dihasilkan oleh *Next Generation Sequencing* juga menjadi fondasi utama dalam perhitungan *genomic estimated breeding values*, yaitu nilai pemuliaan yang diprediksi berdasarkan informasi genomik individu. Dengan memanfaatkan data tersebut, program pemuliaan modern dapat melakukan seleksi secara lebih akurat dan efisien sehingga mempercepat pengembangan strain ikan unggul yang memiliki pertumbuhan cepat, ketahanan penyakit tinggi, serta kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi budidaya (Goodwin et al., 2016).

## 3. Bioinformatika Genom dan Integrasi Data Genetik dalam Pemuliaan Ikan

Bioinformatika merupakan disiplin yang menggabungkan biologi, matematika, dan ilmu komputer untuk menganalisis data biologis dalam skala besar, khususnya data genom. Dalam konteks akuakultur, bioinformatika digunakan untuk mengolah data sequencing menjadi informasi biologis yang dapat digunakan dalam program pemuliaan, seperti identifikasi marker, analisis filogenetik, dan prediksi nilai genetik individu (Mount, 2004).

Proses bioinformatika meliputi beberapa tahap utama: *quality control data sequencing, alignment terhadap reference genome, variant calling* (identifikasi SNP dan InDel), hingga analisis asosiasi genom (*Genome-Wide Association Studies*/GWAS). Hasil analisis ini kemudian diintegrasikan dengan data fenotipik untuk menghasilkan model prediksi sifat unggul pada ikan. Selain itu, perkembangan machine learning dalam bioinformatika telah memungkinkan analisis prediktif yang lebih kompleks, seperti prediksi GEBV berbasis *data multi-omics* (genomik, transkriptomik, dan proteomik). Integrasi ini menjadikan bioinformatika sebagai komponen inti dalam sistem pemuliaan ikan modern berbasis data.

## B. Sekuensing Genetik Akuakultur

Teknologi sekuensing DNA telah mengalami evolusi yang sangat dramatis sejak metode Sanger pertama kali dikembangkan pada tahun 1977. Munculnya teknologi *Next Generation Sequencing* (NGS) pada pertengahan 2000-an membawa revolusi dengan kemampuan menghasilkan ratusan juta hingga miliaran pasang basa data sekuens dalam satu run, dengan biaya yang turun secara eksponensial mengikuti hukum Moore biologis (Mardis, 2011).

Platform NGS yang paling banyak digunakan dalam penelitian akuakultur meliputi: Illumina (*short-read*, akurasi tinggi, *throughput* sangat besar), PacBio SMRT *sequencing* (*long-read*, sangat berguna untuk perakitan genom), dan *Oxford Nanopore* (*ultra long-read*, portabel, real-time). Masing-masing platform memiliki keunggulan dan keterbatasan yang membuatnya cocok untuk aplikasi yang berbeda (Goodwin *et al*., 2016).

Dalam konteks pemuliaan ikan, sekuensing skala besar digunakan untuk: (1) perakitan dan anotasi referensi genom spesies baru, (2) *re-sequencing* seluruh populasi untuk identifikasi varian genetik (SNP, InDel, CNV), (3) *genotyping-by-sequencing* (GBS) dan RAD-seq untuk genotipasi ribuan SNP secara bersamaan tanpa chip SNP yang mahal, dan (4) *transcriptome sequencing* (RNA-seq) untuk memahami ekspresi gen dalam kondisi berbeda (Davey *et al*., 2011).

## 1. Evolusi Teknologi Sekuensing DNA dalam Bioteknologi Akuakultur

Teknologi sekuensing asam deoksiribonukleat telah mengalami perkembangan yang sangat pesat sejak diperkenalkannya metode *Sanger sequencing* pada akhir tahun 1970-an. Metode ini menjadi teknologi utama dalam penentuan urutan nukleotida selama beberapa dekade karena memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam membaca susunan basa genetik. Melalui metode ini, peneliti dapat mengidentifikasi gen, mendeteksi mutasi, serta mempelajari struktur genom berbagai organisme. Namun, seiring meningkatnya kebutuhan akan analisis genom dalam skala besar, metode *Sanger sequencing* menghadapi keterbatasan dalam hal kapasitas analisis, kecepatan pemrosesan data, dan biaya yang relatif tinggi.

Perubahan besar terjadi pada pertengahan tahun 2000-an dengan munculnya teknologi *Next Generation Sequencing* yang memungkinkan proses pembacaan asam deoksiribonukleat dilakukan secara paralel dalam jumlah yang sangat besar. Teknologi ini mampu menghasilkan ratusan juta hingga miliaran basa asam deoksiribonukleat dalam satu kali proses sekuensing dengan biaya yang jauh lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Kemampuan tersebut menjadikan *Next Generation Sequencing* sebagai tonggak penting dalam perkembangan genomik modern karena memungkinkan analisis genom dilakukan secara lebih cepat, efisien, dan komprehensif (Mardis, 2011).

Dalam bidang akuakultur, kemajuan teknologi sekuensing telah mengubah pendekatan penelitian genetika dari analisis beberapa gen tertentu menjadi analisis genom secara menyeluruh atau *whole genome analysis*. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi variasi genetik yang tersebar di seluruh genom, termasuk gen dan wilayah genom yang berperan dalam mengendalikan sifat-sifat ekonomis penting seperti pertumbuhan, reproduksi, efisiensi pemanfaatan pakan, toleransi terhadap lingkungan, dan ketahanan terhadap penyakit. Ketersediaan data genom dalam jumlah besar juga mempercepat proses penemuan penanda genetik yang dapat digunakan dalam program pemuliaan berbasis molekuler.

Perkembangan teknologi sekuensing yang semakin canggih memberikan fondasi kuat bagi penerapan genomik dalam pemuliaan ikan modern. Dengan kemampuan menganalisis genom secara lebih mendalam, peneliti dapat mengestimasi potensi genetik individu secara

lebih akurat dan melakukan seleksi sejak tahap awal kehidupan. Oleh karena itu, evolusi teknologi sekuensing asam deoksiribonukleat tidak hanya meningkatkan pemahaman mengenai keragaman genetik spesies budidaya, tetapi juga berkontribusi secara langsung terhadap pengembangan strain ikan unggul yang lebih produktif, tahan penyakit, dan berkelanjutan untuk mendukung pertumbuhan industri akuakultur di masa depan (Mardis, 2011).

## 2. Platform Utama *Next Generation Sequencing* (NGS)

Terdapat beberapa platform utama *Next Generation Sequencing* yang digunakan dalam penelitian genomik dan aplikasi akuakultur, masing-masing memiliki karakteristik teknis yang berbeda sesuai dengan kebutuhan analisis. Perkembangan berbagai platform ini memberikan fleksibilitas bagi peneliti dalam memilih teknologi yang paling sesuai berdasarkan tujuan penelitian, skala data yang dibutuhkan, tingkat akurasi, panjang pembacaan, serta biaya operasional. Keberadaan berbagai teknologi tersebut telah memperluas kemampuan analisis genom pada spesies ikan budidaya dan organisme akuatik lainnya.

Platform *Illumina* merupakan teknologi yang paling banyak digunakan karena mampu menghasilkan data *short-read* dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi dan kapasitas produksi data yang besar. Teknologi ini sangat efektif untuk identifikasi polimorfisme nukleotida tunggal, analisis keragaman genetik, pemetaan genom, serta studi genom populasi dalam skala besar. Kombinasi antara akurasi tinggi dan biaya per basa yang relatif rendah menjadikan *Illumina* sebagai pilihan utama dalam berbagai penelitian genomik dan program pemuliaan berbasis genom pada akuakultur.

Selain itu, platform *Pacific Biosciences* menggunakan teknologi *Single Molecule Real-Time sequencing* yang mampu menghasilkan pembacaan asam deoksiribonukleat berukuran panjang atau *long-read sequencing*. Teknologi ini sangat bermanfaat dalam penyusunan genom referensi karena mampu melewati wilayah genom yang bersifat repetitif dan kompleks, yang sering kali sulit dianalisis menggunakan teknologi *short-read*. Kemampuan menghasilkan pembacaan yang lebih panjang memungkinkan identifikasi variasi struktural genom secara lebih akurat serta meningkatkan kualitas perakitan genom pada berbagai spesies budidaya.

Platform lain yang semakin berkembang adalah *Oxford Nanopore*, yang menawarkan teknologi *ultra long-read sequencing* dengan perangkat yang relatif kecil dan portabel. Teknologi ini memungkinkan proses sekuensing dilakukan secara *real-time*, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi lapangan, pemantauan cepat penyakit, maupun analisis genom yang membutuhkan hasil dalam waktu singkat. Masing-masing platform memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri, sehingga pemilihan teknologi sekuensing harus disesuaikan dengan tujuan penelitian, karakteristik spesies yang diteliti, serta kompleksitas genom yang akan dianalisis. Oleh karena itu, pemahaman mengenai karakteristik setiap platform menjadi faktor penting dalam merancang penelitian genomik yang efektif dan efisien di bidang akuakultur (Goodwin et al., 2016).

## 3. Aplikasi Sekuensing Genom dalam Akuakultur Modern

Teknologi sekuensing genom telah menjadi salah satu fondasi utama dalam pengembangan bioteknologi dan pemuliaan ikan modern. Kemampuan untuk membaca dan menganalisis informasi genetik secara menyeluruh memungkinkan peneliti memahami struktur genom, variasi genetik, serta mekanisme molekuler yang mendasari berbagai sifat penting pada organisme budidaya. Dalam akuakultur, pemanfaatan teknologi sekuensing tidak hanya berperan dalam penelitian dasar, tetapi juga telah menjadi alat strategis untuk meningkatkan produktivitas, kesehatan, dan efisiensi program pemuliaan. Seiring dengan menurunnya biaya sekuensing dan meningkatnya kapasitas analisis data, aplikasi teknologi ini semakin luas pada berbagai spesies ikan, udang, dan organisme akuatik lainnya.

Salah satu aplikasi terpenting adalah perakitan dan anotasi genom referensi yang berfungsi sebagai peta dasar untuk memahami organisasi genetik suatu spesies. Genom referensi memungkinkan identifikasi lokasi gen, analisis fungsi gen, serta pemetaan wilayah genom yang berhubungan dengan karakter ekonomi penting. Selain itu, pendekatan *re-sequencing* populasi digunakan untuk membandingkan genom berbagai individu dalam suatu populasi sehingga dapat mengidentifikasi variasi genetik seperti *Single Nucleotide Polymorphism*, *Insertion-Deletion*, dan *Copy Number Variation*. Variasi-variasi tersebut sering kali berkaitan dengan karakter penting seperti laju pertumbuhan,

ketahanan terhadap penyakit, toleransi lingkungan, dan efisiensi pemanfaatan pakan.

Perkembangan metode genotipasi berbasis sekuensing, seperti *Genotyping-by-Sequencing* dan *Restriction Site Associated DNA Sequencing*, memungkinkan identifikasi ribuan hingga puluhan ribu penanda genetik secara simultan tanpa memerlukan panel penanda yang telah tersedia sebelumnya. Pendekatan ini sangat bermanfaat untuk spesies non-model yang belum memiliki sumber daya genomik yang lengkap. Selain digunakan untuk analisis keragaman genetik dan struktur populasi, metode tersebut juga mendukung pemetaan gen yang berhubungan dengan sifat kuantitatif dan identifikasi wilayah genom yang menjadi target seleksi. Di sisi lain, teknologi *transcriptome sequencing* atau *RNA sequencing* digunakan untuk menganalisis pola ekspresi gen pada berbagai kondisi fisiologis, seperti stres lingkungan, infeksi penyakit, perubahan nutrisi, maupun proses reproduksi. Informasi ini membantu menjelaskan mekanisme biologis yang mendasari respons organisme terhadap berbagai faktor eksternal (Davey et al., 2011).

Integrasi berbagai jenis data sekuensing genom telah membuka peluang penerapan seleksi genomik dalam program pemuliaan akuakultur modern. Melalui pendekatan ini, informasi genomik digunakan untuk memprediksi nilai pemuliaan individu secara lebih akurat dibandingkan metode seleksi konvensional yang hanya mengandalkan data fenotipik dan silsilah. Hasil prediksi tersebut memungkinkan pemilihan calon induk unggul sejak usia dini sehingga mempercepat kemajuan genetik dan meningkatkan efisiensi program pemuliaan. Dengan demikian, teknologi sekuensing genom tidak hanya berperan sebagai alat penelitian, tetapi juga menjadi komponen utama dalam pengembangan strain budidaya yang lebih produktif, tahan penyakit, adaptif terhadap perubahan lingkungan, dan mampu mendukung keberlanjutan industri akuakultur di masa depan (Davey et al., 2011).

## C. DNA *Barcoding* untuk Identifikasi Spesies

DNA *barcoding* adalah teknik identifikasi spesies menggunakan sekuens DNA pendek yang terstandardisasi dari lokus genomik yang telah disepakati secara internasional. Untuk hewan termasuk ikan, lokus

standar yang digunakan adalah gen sitokrom c oksidase I (COI/cox1) pada DNA mitokondria, yang memiliki variasi sekuens yang cukup tinggi antar spesies namun relatif konservatif dalam satu spesies (Hebert *et al*., 2003; Ward *et al*., 2005).

Dalam industri akuakultur dan perdagangan produk perikanan, DNA *barcoding* memiliki nilai ekonomi dan hukum yang sangat signifikan. Pemalsuan produk ikan (*seafood fraud*) merupakan masalah global yang merugikan konsumen dan industri perikanan yang bertanggung jawab. Studi-studi di berbagai negara menunjukkan bahwa 20-70% produk ikan yang dijual di pasar ritel tidak sesuai dengan label spesiesnya (Marko *et al*., 2004). DNA *barcoding* memungkinkan verifikasi identitas spesies dalam rantai pasokan produk perikanan dari sumber sampai konsumen akhir.

Database BOLD (*Barcode of Life Data System*) dan GenBank menyimpan jutaan *sekuens barcode* dari ribuan spesies ikan yang dapat digunakan sebagai referensi identifikasi. Pengembangan metode eDNA (*environmental* DNA) yang mengkombinasikan *barcoding* dengan *sekuensing metagenomic* memungkinkan deteksi dan identifikasi komunitas ikan dalam suatu badan air hanya dari sampel air, tanpa perlu menangkap ikan sama sekali aplikasi yang sangat potensial untuk survei keanekaragaman hayati dan monitoring ekosistem perairan (Taberlet *et al*., 2012).

## 1. Konsep Dasar dan Prinsip Molekuler DNA *Barcoding*

*DNA barcoding* adalah metode identifikasi spesies yang memanfaatkan analisis sekuens asam deoksiribonukleat pendek dari lokus genetik yang telah distandardisasi. Pada kelompok hewan, termasuk ikan, gen yang paling umum digunakan sebagai penanda adalah gen *cytochrome c oxidase subunit I* yang terdapat pada genom mitokondria. Gen ini dipilih karena memiliki tingkat variasi yang cukup tinggi antarspesies, namun relatif konservatif di dalam spesies yang sama. Karakteristik tersebut menjadikan gen *cytochrome c oxidase subunit I* sangat efektif untuk membedakan spesies yang berkerabat dekat sekalipun, sehingga banyak digunakan dalam penelitian taksonomi, biodiversitas, dan identifikasi organisme akuatik (Hebert et al., 2003; Ward et al., 2005).

Prinsip dasar *DNA barcoding* didasarkan pada konsep bahwa setiap spesies memiliki pola sekuens asam deoksiribonukleat yang khas

atau *genetic signature* pada lokus tertentu. Perbedaan pola sekuens ini memungkinkan identifikasi spesies dilakukan secara objektif dan akurat berdasarkan informasi molekuler. Ketika suatu sampel dianalisis, sekuens yang diperoleh akan dibandingkan dengan sekuens referensi yang tersimpan dalam basis data sehingga identitas spesies dapat ditentukan berdasarkan tingkat kesamaan genetik. Pendekatan ini sangat bermanfaat untuk mengatasi keterbatasan identifikasi morfologi, terutama pada spesies yang memiliki karakter fisik sangat mirip, fase larva, atau sampel yang telah mengalami kerusakan.

Secara molekuler, proses *DNA barcoding* dimulai dengan ekstraksi asam deoksiribonukleat dari jaringan organisme yang akan diidentifikasi. Setelah itu, fragmen gen *cytochrome c oxidase subunit I* diperbanyak menggunakan teknik *Polymerase Chain Reaction* dengan primer yang bersifat universal. Produk amplifikasi kemudian disekuensing untuk memperoleh urutan nukleotida yang akan digunakan sebagai barcode genetik. Tahapan ini menghasilkan data sekuens yang dapat dianalisis lebih lanjut untuk menentukan hubungan dan tingkat kesamaan genetik antarorganisme.

Tahap akhir dalam *DNA barcoding* adalah analisis bioinformatika melalui penyelarasan sekuens dan pencocokan dengan basis data referensi. Apabila sekuens sampel menunjukkan tingkat kesamaan yang sangat tinggi dengan sekuens referensi tertentu, maka identitas spesies dapat ditetapkan dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Keunggulan metode ini terletak pada kecepatan, akurasi, serta kemampuannya mengidentifikasi spesies secara independen dari karakter morfologi. Oleh karena itu, *DNA barcoding* telah menjadi salah satu teknik molekuler yang paling banyak digunakan dalam studi keanekaragaman hayati, konservasi sumber daya perikanan, pemantauan perdagangan spesies, dan pengelolaan sumber daya akuatik secara berkelanjutan (Hebert et al., 2003; Ward et al., 2005).

## 2. Aplikasi DNA *Barcoding* dalam Akuakultur dan Keamanan Pangan

Dalam industri akuakultur dan perdagangan hasil perikanan, *DNA barcoding* memiliki peran yang sangat penting dalam memastikan identitas spesies secara akurat. Identifikasi spesies yang tepat menjadi kebutuhan mendasar karena banyak produk perikanan memiliki kemiripan morfologi, terutama setelah melalui proses pengolahan seperti

fillet, pembekuan, pengalengan, atau pengemasan. Dalam kondisi tersebut, identifikasi berdasarkan karakter fisik sering kali tidak memungkinkan dilakukan secara akurat. Oleh karena itu, *DNA barcoding* menjadi solusi yang efektif untuk memverifikasi asal biologis suatu produk berdasarkan informasi genetik yang dimilikinya.

Salah satu permasalahan utama dalam rantai pasok perikanan global adalah *seafood fraud*, yaitu praktik pelabelan yang tidak sesuai dengan spesies ikan yang sebenarnya. Praktik ini dapat terjadi secara sengaja maupun tidak sengaja dan berpotensi menimbulkan kerugian ekonomi, menyesatkan konsumen, serta mengganggu transparansi perdagangan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa tingkat kesalahan pelabelan pada produk perikanan di beberapa negara dapat mencapai angka yang cukup tinggi. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada nilai ekonomi produk, tetapi juga dapat menimbulkan risiko kesehatan apabila konsumen mengonsumsi spesies yang memiliki kandungan alergen, toksin, atau karakteristik biologis yang berbeda dari informasi yang tercantum pada label (Marko et al., 2004).

Melalui pendekatan *DNA barcoding*, identitas spesies dapat diverifikasi secara akurat pada berbagai tahapan rantai pasok, mulai dari benih dan ikan hidup di fasilitas budidaya hingga produk segar, beku, maupun olahan yang telah dipasarkan. Kemampuan ini menjadikan *DNA barcoding* sebagai alat penting dalam program sertifikasi produk perikanan dan sistem pengendalian mutu. Selain membantu menjaga kepercayaan konsumen, teknologi ini juga mendukung ketertelusuran produk sehingga asal-usul komoditas dapat dilacak secara lebih transparan dan terpercaya.

Selain untuk kepentingan perdagangan dan keamanan pangan, *DNA barcoding* juga banyak digunakan dalam penegakan hukum perikanan dan konservasi sumber daya hayati. Teknologi ini memungkinkan identifikasi spesies yang dilindungi, langka, atau terancam punah yang diperdagangkan secara ilegal. Dengan demikian, otoritas pengawas dapat memastikan kepatuhan terhadap regulasi nasional maupun internasional yang mengatur pemanfaatan dan perdagangan sumber daya perikanan. Oleh karena itu, *DNA barcoding* tidak hanya berfungsi sebagai metode ilmiah untuk identifikasi spesies, tetapi juga sebagai instrumen penting dalam mendukung keamanan pangan, perlindungan konsumen, pengawasan perdagangan, dan tata kelola industri perikanan yang berkelanjutan (Marko et al., 2004).

## D. *Transcriptomics* dan *Proteomics*

*Transcriptomics* adalah studi tentang keseluruhan mRNA (*transcriptome*) yang diekspresikan oleh sel atau jaringan pada kondisi tertentu. Berbeda dengan genom yang relatif statis, *transcriptome* bersifat dinamis dan mencerminkan aktivitas gen yang sedang berlangsung sebagai respons terhadap kondisi fisiologis atau lingkungan. Teknologi RNA-seq (*RNA sequencing*) menggunakan NGS untuk mengukur ekspresi ribuan gen secara simultan, memberikan gambaran komprehensif tentang mekanisme molekuler yang mendasari sifat-sifat penting dalam akuakultur (Wang *et al*., 2009).

Dalam konteks pemuliaan ikan, *transcriptomics* telah memberikan wawasan penting tentang mekanisme molekuler ketahanan terhadap penyakit, adaptasi terhadap perubahan suhu, regulasi pertumbuhan, dan metabolisme nutrisi. Identifikasi gen-gen yang diekspresikan secara berbeda (*differentially expressed genes*/DEGs) antara individu yang rentan dan resistan terhadap suatu penyakit, misalnya, dapat memberikan kandidat gen atau marker untuk program pemuliaan berbasis MAS (Poynter & DeWoody, 2009).

*Proteomics*, sebagai pelengkap *transcriptomics*, mempelajari keseluruhan protein yang diekspresikan oleh suatu sistem biologis. Teknologi *mass spectrometry* berbasis tandem MS (MS/MS) memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi ribuan protein secara simultan. Dalam akuakultur, *proteomics* telah diaplikasikan untuk studi kualitas daging ikan (tekstur, kandungan protein miofibrilar), respons stres, dan mekanisme resistensi terhadap obat-obatan (Rodrigues *et al*., 2012).

### 1. Konsep Dasar *Transcriptomics* dan Dinamika Ekspresi Gen

*Transcriptomics* adalah cabang ilmu genomik yang mempelajari seluruh molekul *messenger ribonucleic acid* yang diekspresikan oleh sel, jaringan, atau organisme pada kondisi tertentu. Kumpulan seluruh molekul *messenger ribonucleic acid* yang diekspresikan tersebut dikenal sebagai *transcriptome*. Berbeda dengan genom yang relatif tetap sepanjang kehidupan organisme, *transcriptome* bersifat sangat dinamis dan dapat berubah sebagai respons terhadap berbagai faktor internal maupun eksternal. Oleh karena itu, analisis *transcriptome* memberikan gambaran mengenai gen-gen yang sedang aktif dan berfungsi pada suatu

waktu tertentu, sehingga sering dianggap sebagai representasi aktivitas genetik yang sedang berlangsung dalam organisme (Wang et al., 2009).

Ekspresi gen merupakan proses biologis yang mengubah informasi genetik yang tersimpan dalam asam deoksiribonukleat menjadi produk fungsional, terutama protein. Tingkat ekspresi suatu gen dapat meningkat atau menurun tergantung pada kebutuhan fisiologis organisme dan pengaruh lingkungan di sekitarnya. Faktor-faktor seperti suhu, salinitas, kualitas air, ketersediaan nutrisi, stres, infeksi patogen, serta tahap perkembangan organisme dapat memengaruhi pola ekspresi gen secara signifikan. Dengan mempelajari perubahan ekspresi gen tersebut, peneliti dapat memahami mekanisme molekuler yang mendasari berbagai respons biologis yang terjadi pada organisme akuatik.

Perkembangan teknologi *Next Generation Sequencing* telah mendorong kemajuan pesat dalam bidang *transcriptomics* melalui penerapan metode *RNA sequencing*. Teknologi ini memungkinkan pengukuran tingkat ekspresi ribuan hingga puluhan ribu gen secara simultan dalam satu eksperimen dengan tingkat sensitivitas dan akurasi yang tinggi. Melalui *RNA sequencing*, peneliti dapat mengidentifikasi gen yang mengalami peningkatan atau penurunan ekspresi, menemukan transkrip baru yang sebelumnya belum diketahui, serta menganalisis jalur biologis yang terlibat dalam berbagai proses fisiologis. Dibandingkan metode sebelumnya, *RNA sequencing* memberikan cakupan analisis yang lebih luas dan mendalam terhadap dinamika ekspresi gen dalam organisme.

Dalam bidang akuakultur, *transcriptomics* memiliki peran yang sangat penting untuk memahami respons molekuler ikan terhadap berbagai tantangan lingkungan dan budidaya. Teknologi ini banyak digunakan untuk mengkaji respons terhadap stres lingkungan, infeksi bakteri, virus, dan parasit, perubahan pola pemberian pakan, serta proses pertumbuhan dan reproduksi. Informasi yang diperoleh dari analisis *transcriptome* dapat digunakan untuk mengidentifikasi gen kandidat yang berhubungan dengan sifat-sifat unggul, memahami mekanisme adaptasi organisme, dan mendukung pengembangan program pemuliaan berbasis genomik. Dengan demikian, *transcriptomics* menjadi salah satu pendekatan penting dalam meningkatkan produktivitas, kesehatan, dan keberlanjutan sistem akuakultur modern (Wang et al., 2009).

## 2. Aplikasi Transcriptomics dalam Pemuliaan dan Ketahanan Ikan

*Transcriptomics* memiliki peran yang semakin penting dalam program pemuliaan ikan karena memungkinkan identifikasi gen dan jalur biologis yang berhubungan dengan karakter unggul. Melalui analisis ekspresi gen, peneliti dapat mengetahui gen-gen yang aktif pada individu dengan performa tinggi dibandingkan individu dengan performa rendah. Informasi ini membantu mengungkap mekanisme molekuler yang mendasari sifat-sifat penting seperti laju pertumbuhan, efisiensi pemanfaatan pakan, kemampuan reproduksi, toleransi terhadap stres lingkungan, dan ketahanan terhadap penyakit. Dengan demikian, *transcriptomics* menjadi alat yang sangat berharga untuk mendukung seleksi genetik yang lebih akurat dan berbasis mekanisme biologis.

Dalam konteks ketahanan penyakit, *transcriptomics* digunakan untuk mempelajari respons sistem imun ikan terhadap infeksi bakteri, virus, maupun parasit. Analisis ekspresi gen memungkinkan identifikasi gen-gen yang terlibat dalam proses pertahanan tubuh, termasuk gen yang mengatur respons inflamasi, produksi protein antimikroba, aktivasi sel imun, dan mekanisme perlindungan lainnya. Dengan membandingkan pola ekspresi gen antara ikan yang tahan dan rentan terhadap penyakit, peneliti dapat menemukan gen kandidat yang berperan penting dalam ketahanan penyakit. Informasi tersebut kemudian dapat dimanfaatkan dalam program pemuliaan untuk meningkatkan frekuensi alel yang menguntungkan dalam populasi budidaya.

Selain untuk memahami mekanisme ketahanan penyakit, *transcriptomics* juga digunakan untuk mengevaluasi respons ikan terhadap berbagai faktor lingkungan yang dapat memengaruhi performa budidaya. Perubahan suhu, salinitas, kadar oksigen terlarut, kualitas air, dan kondisi stres lainnya dapat memicu perubahan pola ekspresi gen yang berkaitan dengan adaptasi fisiologis. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat mengidentifikasi biomarker molekuler yang menunjukkan tingkat toleransi individu terhadap kondisi lingkungan tertentu. Biomarker tersebut dapat digunakan sebagai indikator awal dalam proses seleksi sehingga membantu menghasilkan populasi yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan budidaya.

Integrasi data *transcriptomics* dengan informasi genomik, fenotipik, dan silsilah semakin memperkuat penerapannya dalam pemuliaan ikan modern. Data ekspresi gen dapat digunakan untuk

memvalidasi gen kandidat yang ditemukan melalui studi genomik serta membantu memahami fungsi biologis dari variasi genetik yang teridentifikasi. Pendekatan terpadu ini memungkinkan pengembangan strategi seleksi yang lebih efektif dalam meningkatkan pertumbuhan, kesehatan, dan ketahanan ikan terhadap berbagai tekanan lingkungan. Oleh karena itu, *transcriptomics* tidak hanya berperan sebagai alat penelitian dasar, tetapi juga menjadi komponen penting dalam pengembangan strain ikan unggul yang produktif, tahan penyakit, dan berkelanjutan untuk mendukung kemajuan industri akuakultur (Poynter & DeWoody, 2009).

## 3. *Proteomics* dan Integrasi *Multi-Omics* dalam Akuakultur Modern

*Proteomics* adalah studi mengenai seluruh protein (*proteome*) yang diekspresikan oleh suatu organisme, jaringan, atau sel pada kondisi tertentu. Karena protein merupakan molekul eksekutor utama dalam sistem biologis, *proteomics* memberikan gambaran langsung mengenai fungsi biologis yang terjadi pada tingkat seluler. Teknologi utama dalam proteomics adalah *mass spectrometry*, khususnya tandem *mass spectrometry* (MS/MS), yang memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi ribuan protein secara simultan (Rodrigues *et al*., 2012).

Dalam akuakultur, *proteomics* digunakan untuk berbagai aplikasi penting, seperti analisis kualitas daging ikan (tekstur, komposisi protein miofibrilar, dan nilai nutrisi), studi respons stres terhadap kondisi lingkungan ekstrem, serta identifikasi protein yang terlibat dalam mekanisme resistensi terhadap penyakit atau perlakuan farmakologis. *Data proteomics* juga sangat berguna untuk memahami perbedaan kualitas produk antara strain ikan yang berbeda secara genetik.

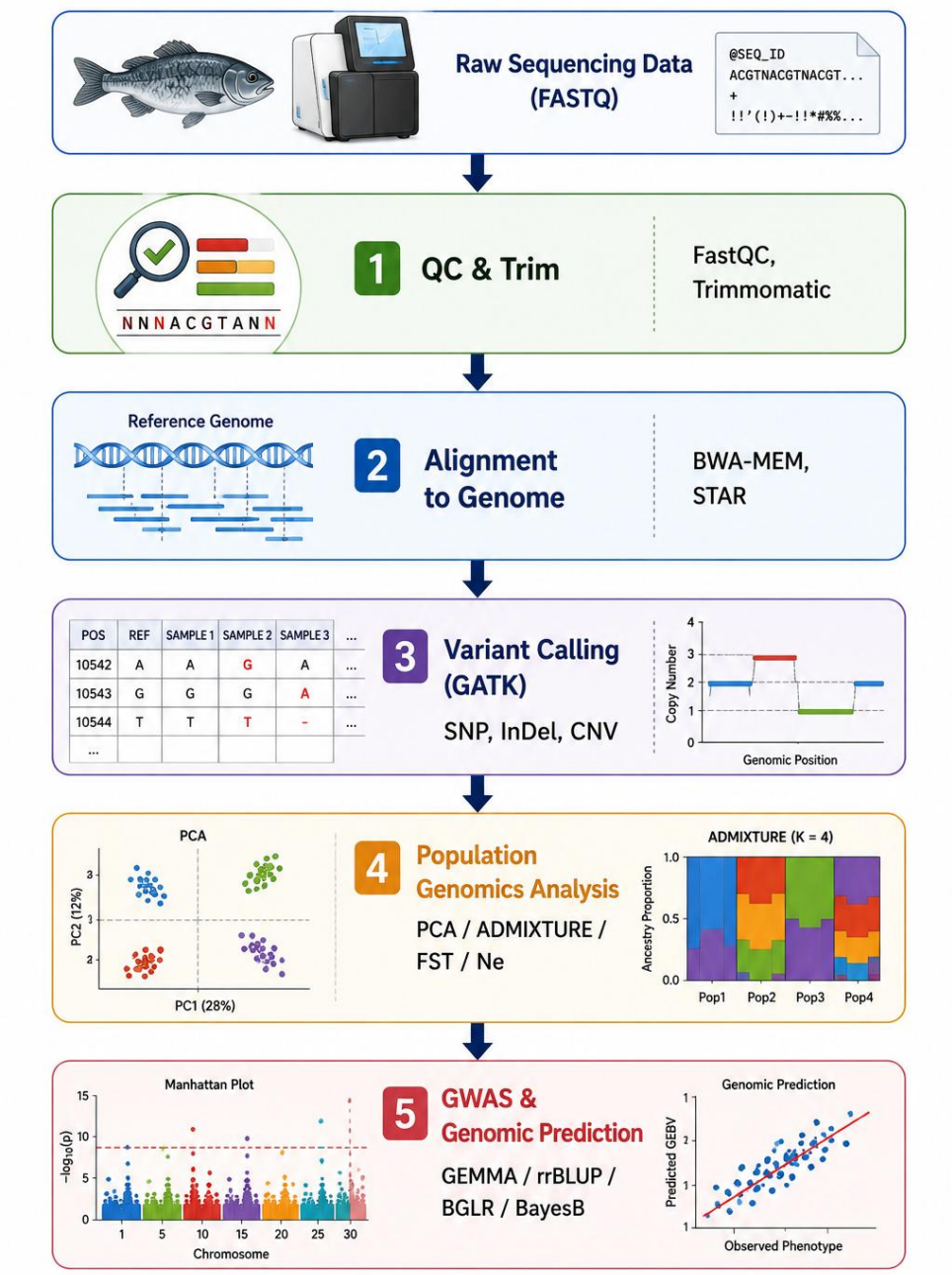
Perkembangan terbaru mengarah pada pendekatan *multi-omics integration*, yaitu penggabungan *data genomics, transcriptomics*, dan *proteomics* untuk menghasilkan model biologis yang lebih komprehensif. Pendekatan ini memungkinkan pemetaan hubungan dari DNA → RNA → protein → fenotipe, sehingga memperkuat dasar ilmiah dalam program pemuliaan ikan modern berbasis data besar (*systems biology*). Dengan integrasi ini, prediksi sifat unggul dapat dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dan lebih cepat dibandingkan pendekatan konvensional berbasis fenotipe saja.

## E. Bioinformatika dalam Pemuliaan Ikan

Bioinformatika adalah disiplin ilmu yang mengintegrasikan ilmu komputer, statistik, matematika, dan biologi untuk menganalisis dan menginterpretasikan data biologis skala besar, terutama data sekuens DNA/RNA. Dalam era genomik, kemampuan menganalisis data bioinformatika dengan tepat menjadi kompetensi yang tidak dapat dipisahkan dari program pemuliaan ikan modern (Pevsner, 2015). Pipeline analisis bioinformatika standar untuk data genomik ikan mencakup serangkaian tahapan yang saling berkaitan: (1) *quality control* dan *trimming data raw reads*, (2) *mapping/alignment* ke referensi genom, (3) *variant calling* untuk identifikasi SNP dan InDel, (4) filtering dan anotasi varian, (5) analisis populasi genetik (PCA, *admixture, phylogenomics*), dan (6) *Genome-Wide Association Study* (GWAS) untuk identifikasi varian yang berhubungan dengan sifat-sifat produksi (Davey *et al*., 2011).

Tools bioinformatika yang paling umum digunakan dalam penelitian genomik akuakultur mencakup: BWA dan STAR untuk alignment, GATK untuk variant calling, PLINK dan ADMIXTURE untuk analisis populasi, GEMMA dan GCTA untuk GWAS dan estimasi heritabilitas, serta R packages seperti rrBLUP, BGLR, dan GSCV untuk *genomic prediction*. Kemampuan pemrograman dalam Python dan R menjadi keterampilan yang semakin esensial bagi peneliti pemuliaan ikan modern (Meuwissen *et al*., 2016).

Gambar 5. *Workflow* Analisis Bioinformatika Standar untuk Data Genomik Ikan Budidaya




Gambar 6 menjelaskan alur kerja (*workflow*) analisis bioinformatika yang digunakan dalam penelitian genomik ikan, mulai dari data sekuensing mentah hingga tahap interpretasi hasil untuk kepentingan pemuliaan. Setiap tahapan dalam *pipeline* ini saling

terhubung dan memiliki peran penting dalam mengubah data biologis mentah menjadi informasi genetik yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan seleksi.

*Workflow* ini menunjukkan bahwa bioinformatika berperan sebagai jembatan antara data genomik mentah dan aplikasi praktis dalam program pemuliaan ikan. Integrasi seluruh tahapan tersebut memungkinkan seleksi genetik dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi, waktu yang lebih cepat, serta efisiensi yang lebih baik dibandingkan metode konvensional berbasis fenotipik semata.

## 1. Aplikasi Bioinformatika dalam Analisis Genom Ikan

Bioinformatika merupakan bidang yang mengintegrasikan biologi, statistika, dan ilmu komputer untuk mengelola serta menganalisis data biologis dalam jumlah besar. Dalam pemuliaan ikan modern, bioinformatika berperan penting dalam mengubah data genomik mentah yang dihasilkan dari teknologi sekuensing menjadi informasi biologis yang dapat dimanfaatkan untuk mendukung pengambilan keputusan seleksi. Perkembangan teknologi *Next Generation Sequencing* menghasilkan volume data genom yang sangat besar sehingga memerlukan pendekatan bioinformatika untuk melakukan pengolahan, penyimpanan, analisis, dan interpretasi data secara efisien. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai struktur genetik, keragaman genom, serta hubungan antara genotipe dan fenotipe pada spesies ikan budidaya.

Salah satu aplikasi utama bioinformatika adalah analisis variasi genetik yang meliputi identifikasi *Single Nucleotide Polymorphism*, *Insertion-Deletion*, dan *Copy Number Variation*. Variasi genetik tersebut merupakan sumber utama keragaman yang dapat dimanfaatkan dalam program pemuliaan. Analisis biasanya dilakukan melalui serangkaian tahapan yang dikenal sebagai *pipeline* bioinformatika, dimulai dari pengendalian kualitas data sekuensing, pemetaan hasil pembacaan terhadap genom referensi, hingga identifikasi variasi genetik atau *variant calling*. Hasil analisis ini memberikan gambaran yang komprehensif mengenai distribusi variasi genetik dalam populasi serta membantu mengidentifikasi penanda molekuler yang berhubungan dengan sifat-sifat ekonomi penting pada ikan budidaya (Davey et al., 2011).

Selain analisis variasi genetik, bioinformatika juga berperan penting dalam analisis struktur dan dinamika populasi. Berbagai metode seperti *Principal Component Analysis*, *ADMIXTURE*, dan estimasi indeks diferensiasi genetik digunakan untuk mengevaluasi hubungan kekerabatan, tingkat keragaman genetik, serta pola diferensiasi antar populasi atau strain. Informasi tersebut sangat penting dalam pengelolaan sumber daya genetik karena dapat membantu mencegah terjadinya kehilangan variasi genetik, mengurangi risiko *inbreeding*, serta mendukung perancangan strategi persilangan yang lebih efektif. Analisis populasi juga memberikan dasar ilmiah dalam konservasi plasma nutfah dan pengembangan populasi pemuliaan yang berkelanjutan.

Aplikasi lain yang sangat penting adalah *Genome-Wide Association Study*, yaitu pendekatan yang digunakan untuk mengidentifikasi wilayah genom yang berasosiasi dengan karakter kuantitatif tertentu. Melalui analisis ini, peneliti dapat menemukan lokus genetik yang berhubungan dengan sifat-sifat penting seperti pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pemanfaatan pakan, dan toleransi terhadap lingkungan. Kombinasi antara analisis variasi genetik, analisis populasi, dan *Genome-Wide Association Study* menjadikan bioinformatika sebagai fondasi utama dalam penerapan seleksi berbasis penanda dan seleksi genomik. Dengan demikian, bioinformatika tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis data, tetapi juga menjadi komponen strategis dalam mempercepat kemajuan genetik dan meningkatkan efisiensi program pemuliaan ikan di era akuakultur modern (Davey et al., 2011).

## 2. Integrasi Bioinformatika dalam *Genomic Prediction* dan Pemuliaan Modern

Integrasi bioinformatika dalam *genomic prediction* telah membawa perubahan besar dalam sistem pemuliaan ikan modern. Pendekatan ini memungkinkan prediksi potensi genetik individu berdasarkan informasi genomik yang diperoleh dari ribuan hingga jutaan penanda genetik yang tersebar di seluruh genom. Berbeda dengan metode seleksi konvensional yang bergantung pada pengamatan fenotipe dan informasi silsilah, *genomic prediction* memanfaatkan hubungan langsung antara variasi genomik dan performa individu. Hasil dari pendekatan ini berupa *Genomic Estimated Breeding Value*, yaitu

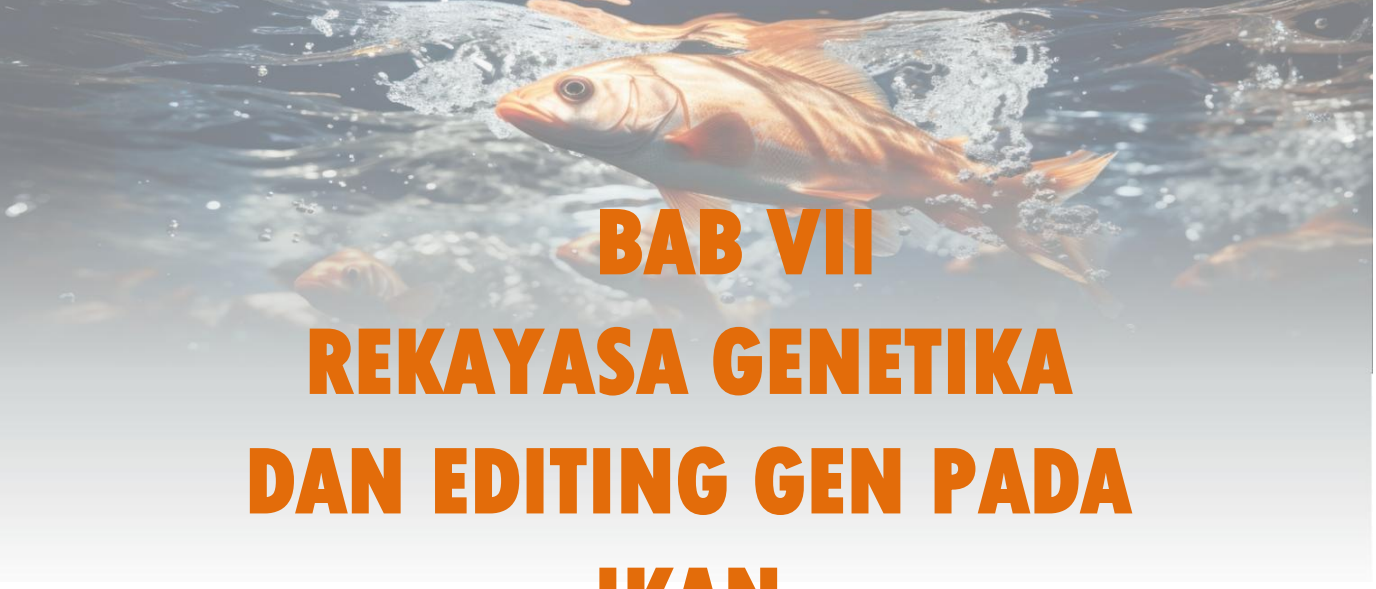
estimasi nilai pemuliaan yang mencerminkan potensi genetik individu untuk mewariskan sifat unggul kepada generasi berikutnya. Dengan demikian, seleksi dapat dilakukan sejak usia dini tanpa harus menunggu karakter fenotipik muncul secara penuh (Meuwissen et al., 2001).

Untuk menghasilkan prediksi yang akurat, bioinformatika memanfaatkan berbagai model statistik dan komputasional yang mampu mengolah data genomik dalam jumlah sangat besar. Beberapa model yang umum digunakan meliputi *Genomic Best Linear Unbiased Prediction*, *Ridge Regression Best Linear Unbiased Prediction*, *BayesB*, dan *Bayesian Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*. Model-model tersebut dirancang untuk mengestimasi kontribusi masing-masing penanda genetik terhadap suatu karakter kuantitatif, seperti pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pemanfaatan pakan, dan kemampuan reproduksi. Dengan mengintegrasikan data genotipe dan fenotipe dari populasi referensi, model dapat memprediksi performa genetik individu yang belum memiliki data fenotipik secara langsung. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan akurasi seleksi sekaligus mempercepat kemajuan genetik dalam program pemuliaan (Meuwissen et al., 2001).

Perkembangan teknologi informasi dan komputasi telah memperluas peran bioinformatika dari sekadar alat analisis data menjadi komponen utama dalam sistem pemuliaan berbasis data. Penggunaan bahasa pemrograman seperti *R* dan *Python* memungkinkan pengembangan *pipeline* analisis yang terotomatisasi, mulai dari pengolahan data sekuensing, identifikasi variasi genetik, analisis asosiasi genom, hingga perhitungan nilai pemuliaan genomik. Otomatisasi ini meningkatkan efisiensi kerja, mengurangi kesalahan analisis, serta memungkinkan pengolahan data dalam skala yang jauh lebih besar dibandingkan metode manual. Selain itu, integrasi dengan teknik komputasi berperforma tinggi memungkinkan analisis jutaan penanda genetik dalam waktu yang relatif singkat.

Integrasi bioinformatika, genomik, dan komputasi modern telah memperkuat konsep *precision breeding* dalam akuakultur. Dalam pendekatan ini, keputusan pemuliaan tidak hanya didasarkan pada performa fenotipik yang tampak, tetapi juga didukung oleh informasi genomik yang komprehensif dan dianalisis secara komputasional. Hal tersebut memungkinkan pemilihan calon induk yang lebih akurat, pengurangan interval generasi, serta peningkatan efisiensi program

pemuliaan secara keseluruhan. Dengan terus berkembangnya teknologi genomik dan kapasitas komputasi, integrasi bioinformatika diperkirakan akan menjadi fondasi utama dalam pengembangan strain ikan unggul yang produktif, tahan penyakit, adaptif terhadap lingkungan, dan mampu mendukung keberlanjutan industri akuakultur modern (Meuwissen et al., 2001).



# BAB VII
# REKAYASA GENETIKA DAN EDITING GEN PADA IKAN

## A. Konsep Rekayasa Genetika Akuatik

Rekayasa genetika adalah kumpulan teknik yang memungkinkan modifikasi informasi genetik suatu organisme secara langsung dan terarah, melampaui apa yang dapat dicapai melalui persilangan konvensional. Dalam konteks akuakultur, rekayasa genetika mencakup spektrum teknik yang luas dari transformasi gen (transgenik) yang memasukkan gen dari organisme lain, hingga gene editing presisi yang memodifikasi gen-gen endogen tanpa penambahan DNA asing (*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2019).

Sejarah rekayasa genetika pada ikan dimulai pada tahun 1984 ketika Zhu *et al*. berhasil mengintroduksi gen ke dalam zigot ikan mas melalui mikroinjeksi. Sejak saat itu, puluhan spesies ikan telah digunakan sebagai sistem model atau target rekayasa genetika, dengan salmon Atlantik (*AquAdvantage Salmon*) menjadi produk ikan transgenik pertama yang mendapat persetujuan regulasi untuk konsumsi manusia di Amerika Serikat pada tahun 2015 dan Kanada pada tahun 2013 (FDA, 2015; Health Canada, 2013).

Perkembangan teknologi *gene editing*, terutama CRISPR-Cas9, telah membuka babak baru dalam rekayasa genetika ikan yang berbeda secara fundamental dari pendekatan transgenik sebelumnya. Dengan CRISPR-Cas9, modifikasi genetik dapat dilakukan secara jauh lebih presisi, efisien, dan berbiaya rendah, serta dalam banyak kasus tanpa

penambahan DNA asing dari spesies lain, yang memiliki implikasi regulasi yang sangat berbeda di berbagai yurisdiksi (Doudna & Charpentier, 2012).

## 1. Evolusi Rekayasa Genetika dalam Akuakultur

Rekayasa genetika pada ikan mengalami perkembangan bertahap dari teknik konvensional menuju pendekatan molekuler yang sangat presisi. Tahap awal ditandai dengan penggunaan teknologi transgenik, yaitu pemasukan gen asing ke dalam genom ikan melalui teknik mikroinjeksi, elektroporasi, atau vektor virus. Tujuan utama pendekatan ini adalah meningkatkan karakter ekonomi penting seperti laju pertumbuhan, efisiensi pakan, dan ketahanan terhadap lingkungan ekstrem. Salah satu contoh klasik adalah introduksi gen hormon pertumbuhan (*growth hormone gene*) yang menghasilkan peningkatan laju pertumbuhan signifikan pada beberapa spesies ikan budidaya (Zhu *et al*., 1985).

Namun, pendekatan 146enetic146ic menghadapi tantangan besar terkait stabilitas ekspresi gen, mosaicism, serta isu *biosafety* dan regulasi. Hal ini mendorong pergeseran menuju teknologi *gene editing* yang lebih presisi. Teknologi CRISPR-Cas9 menjadi titik balik penting dalam evolusi rekayasa genetika karena memungkinkan modifikasi gen spesifik pada lokasi tertentu dalam genom tanpa harus memasukkan DNA asing secara permanen. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi rekayasa 146enetic, tetapi juga membuka peluang untuk memperbaiki gen endogen yang terkait dengan sifat produksi dan ketahanan penyakit secara langsung (Doudna & Charpentier, 2012; *National Academies of Sciences*, 2019).

## 2. Aplikasi Rekayasa Genetika Presisi pada Sifat Akuakultur

Aplikasi rekayasa genetika presisi dalam akuakultur difokuskan pada peningkatan sifat-sifat ekonomi penting yang sulit diperbaiki melalui seleksi konvensional. Salah satu target utama adalah peningkatan laju pertumbuhan melalui manipulasi gen hormon pertumbuhan (GH) dan jalur regulasinya. Modifikasi pada gen pengatur metabolisme dan aksis endokrin dapat menghasilkan ikan dengan efisiensi konversi pakan yang lebih baik serta waktu panen yang lebih singkat. Selain itu, gene editing juga digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit dengan menargetkan gen-gen yang terlibat

dalam sistem imun bawaan, seperti gen reseptor patogen dan jalur interferon.

Aplikasi lainnya adalah pengembangan ikan steril (*sterility induction*) melalui *knockout gen* yang berperan dalam gametogenesis, seperti gen yang terlibat dalam perkembangan sel germinal. Ikan steril memiliki nilai penting dalam akuakultur karena dapat mencegah reproduksi tidak terkontrol jika terjadi pelepasan ke lingkungan serta mengalihkan energi metabolik dari reproduksi ke pertumbuhan. Selain itu, rekayasa genetika juga mulai digunakan untuk meningkatkan toleransi lingkungan, seperti ketahanan terhadap suhu ekstrem, salinitas tinggi, dan kondisi hipoksia, yang semakin relevan dalam konteks perubahan iklim global dan intensifikasi sistem budidaya ikan modern.

## B. Transgenik pada Ikan Budidaya

Ikan transgenik adalah ikan yang genomnya telah dimodifikasi melalui integrasi sekuens DNA eksogen (*transgene*) yang berasal dari spesies yang sama atau berbeda. *Transgene* yang paling umum diaplikasikan pada ikan akuakultur adalah gen hormon pertumbuhan (*Growth Hormone*, GH) di bawah kendali promoter yang aktif secara konstitutif atau diregulasi secara spesifik-jaringan. Ekspresi berlebihan GH endogen atau GH dari spesies lain dapat mempercepat laju pertumbuhan ikan secara dramatis (Du *et al*., 1992).

AquAdvantage Salmon, yang dikembangkan oleh *AquaBounty Technologies*, merupakan contoh paling terkenal dari ikan transgenik komersial. Ikan ini adalah salmon Atlantik yang mengekspresikan gen GH dari Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) di bawah kendali promoter dari ocean pout (*Zoarces americanus*) yang aktif sepanjang tahun. Hasilnya adalah salmon yang tumbuh 2-4 kali lebih cepat dari salmon Atlantik konvensional, mencapai ukuran panen dalam 16-18 bulan dibandingkan 30 bulan untuk salmon konvensional (Devlin *et al*., 2004; FDA, 2015).

Kekhawatiran utama terhadap ikan transgenik meliputi: risiko pelepasan ke alam liar dan dampaknya terhadap ekosistem perairan alami (*ecological risk*), keamanan pangan bagi konsumen (*food safety*), dan dampak sosial-ekonomi terhadap komunitas nelayan tradisional. Untuk mengatasi risiko ekologis, semua ikan AquAdvantage adalah

betina triploid yang steril, diproduksi dalam fasilitas darat yang terisolasi dari lingkungan alam (Van Eenennaam *et al*., 2019).

## 1. Teknologi Produksi dan Mekanisme Ekspresi Ikan Transgenik

Produksi ikan transgenik merupakan salah satu penerapan bioteknologi modern yang bertujuan memasukkan gen tertentu ke dalam genom ikan untuk menghasilkan karakter yang diinginkan. Proses ini diawali dengan introduksi asam deoksiribonukleat eksogen atau *transgene* ke dalam embrio atau zigot pada tahap awal perkembangan. Berbagai metode dapat digunakan untuk memasukkan *transgene*, antara lain mikroinjeksi langsung ke dalam inti sel, elektroporasi yang memanfaatkan pulsa listrik untuk meningkatkan permeabilitas membran sel, serta penggunaan vektor genetik sebagai pembawa gen target. *Transgene* yang dimasukkan umumnya terdiri atas gen yang mengendalikan karakter tertentu dan dikombinasikan dengan *promoter* yang berfungsi mengatur tingkat serta lokasi ekspresi gen dalam tubuh ikan (Du et al., 1992).

Pemilihan *promoter* merupakan faktor penting dalam keberhasilan produksi ikan transgenik. *Promoter* dapat bersifat konstitutif, yaitu aktif secara terus-menerus pada berbagai jaringan tubuh, atau bersifat spesifik jaringan sehingga hanya aktif pada organ tertentu sesuai tujuan penelitian atau pemuliaan. Salah satu contoh yang paling banyak diteliti adalah penggunaan gen hormon pertumbuhan yang dikombinasikan dengan *promoter* kuat untuk meningkatkan produksi hormon secara berkelanjutan. Kombinasi tersebut dirancang agar gen yang diintroduksikan dapat diekspresikan secara efektif dan menghasilkan perubahan fenotip yang nyata pada individu transgenik.

Setelah berhasil terintegrasi ke dalam genom, *transgene* akan mengikuti mekanisme ekspresi gen normal yang berlangsung di dalam sel inang. Informasi genetik pada *transgene* akan ditranskripsi menjadi asam ribonukleat pembawa pesan dan selanjutnya diterjemahkan menjadi protein fungsional. Protein yang dihasilkan kemudian memengaruhi berbagai proses fisiologis yang berkaitan dengan karakter target. Pada ikan yang membawa gen hormon pertumbuhan, peningkatan produksi hormon tersebut dapat mempercepat metabolisme, meningkatkan efisiensi pemanfaatan pakan, merangsang pertumbuhan jaringan tubuh, dan menghasilkan laju pertumbuhan yang lebih cepat dibandingkan ikan non-transgenik. Oleh karena itu, teknologi transgenik

memiliki potensi besar untuk meningkatkan produktivitas dalam sistem budidaya.

Meskipun demikian, keberhasilan pengembangan ikan transgenik tidak hanya ditentukan oleh keberhasilan memasukkan gen target, tetapi juga oleh stabilitas ekspresinya dalam jangka panjang. Tingkat ekspresi *transgene* dapat dipengaruhi oleh lokasi integrasi gen dalam genom, jumlah salinan gen yang masuk, serta interaksinya dengan gen-gen endogen yang sudah ada. Selain itu, kemampuan *transgene* untuk diwariskan secara stabil kepada generasi berikutnya menjadi faktor penting dalam pengembangan strain transgenik yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan. Variabilitas ekspresi dan pewarisan gen tersebut masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan ikan transgenik untuk aplikasi komersial, sehingga diperlukan evaluasi genetik dan biologis yang menyeluruh sebelum teknologi ini diterapkan secara luas (Du et al., 1992).

## 2. Implementasi dan Isu Biosekuriti Ikan Transgenik

Implementasi ikan transgenik dalam industri akuakultur telah mencapai tahap komersial melalui pengembangan AquAdvantage Salmon, yang menjadi contoh pertama ikan transgenik yang disetujui untuk konsumsi manusia secara regulatif. Ikan ini membawa gen hormon pertumbuhan dari Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) yang dikendalikan oleh promoter dari *ocean pout* (*Zoarces americanus*), sehingga ekspresi hormon pertumbuhan berlangsung sepanjang tahun tanpa dipengaruhi musim. Hasilnya adalah peningkatan laju pertumbuhan hingga 2–4 kali lebih cepat dibandingkan salmon konvensional, dengan waktu panen yang jauh lebih singkat (Devlin *et al*., 2004; FDA, 2015).

Meskipun memiliki potensi ekonomi yang besar, ikan transgenik juga memunculkan berbagai isu biosekuriti dan etika. Risiko utama meliputi kemungkinan pelepasan ke lingkungan alami yang dapat mengganggu keseimbangan ekosistem melalui kompetisi atau introgression genetik. Selain itu, terdapat kekhawatiran terkait keamanan pangan dan penerimaan sosial oleh konsumen. Untuk memitigasi risiko tersebut, strategi seperti produksi ikan steril (*triploid female*), sistem budidaya tertutup berbasis darat, serta kontrol reproduksi ketat diterapkan secara ketat. Pendekatan ini menunjukkan bahwa

keberhasilan teknologi transgenik tidak hanya bergantung pada aspek biologis, tetapi juga pada regulasi, biosekuriti, dan penerimaan publik.

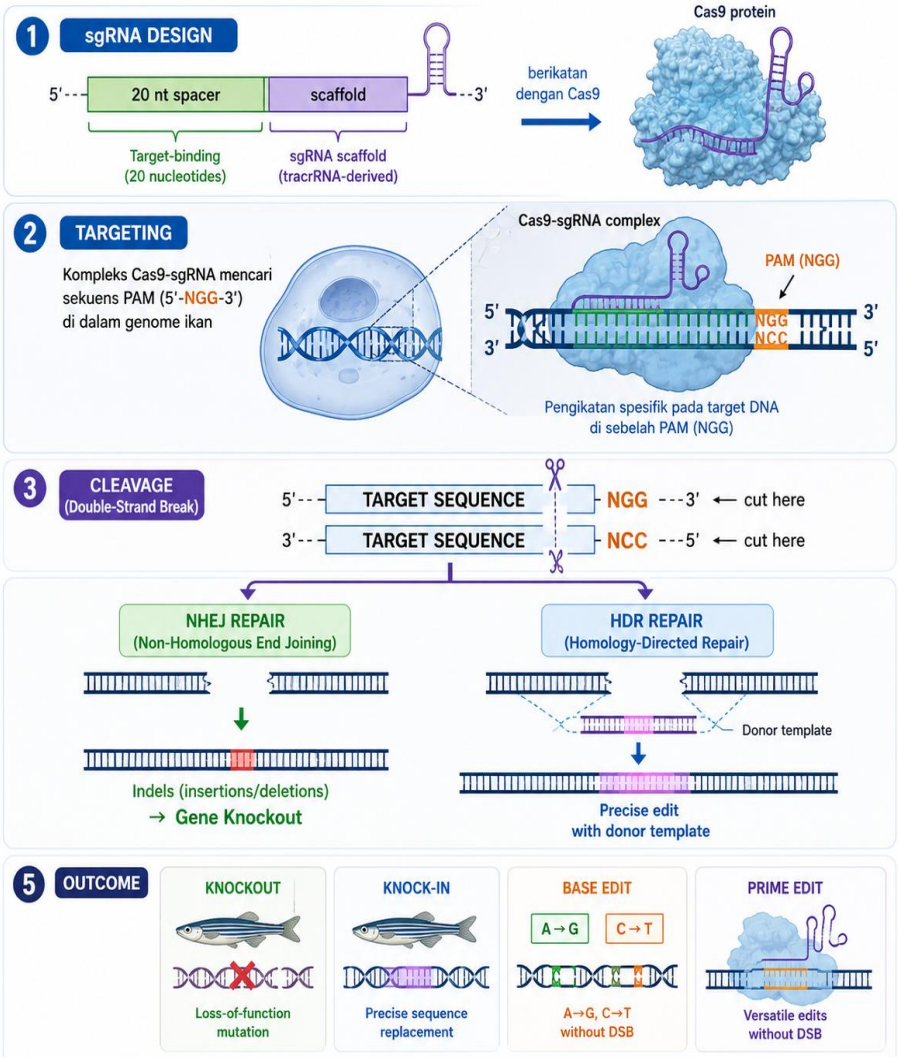
## C. Teknologi CRISPR-Cas9

CRISPR-Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* - CRISPR-*associated protein* 9) adalah sistem penyuntingan gen yang terinspirasi dari mekanisme imunitas adaptif bakteri terhadap infeksi faga. Sistem ini memungkinkan pemotongan untai ganda DNA (*double-strand break*, DSB) pada lokasi yang sangat spesifik dalam genom, yang kemudian diperbaiki oleh mekanisme repair seluler melalui jalur *Non-Homologous End Joining* (NHEJ) atau *Homology-Directed Repair* (HDR) (Doudna & Charpentier, 2012; Hsu *et al*., 2014).

Komponen utama sistem CRISPR-Cas9 terdiri dari: (1) protein *endonuklease* Cas9 yang berfungsi sebagai 'gunting molekuler', dan (2) *single guide* RNA (sgRNA) yang terdiri dari tracrRNA (untuk mengikat Cas9) dan crRNA (untuk mengarahkan kompleks ke sekuens target melalui komplementaritas Watson-Crick). Dengan mengganti sekuens spacer dalam crRNA (20 nukleotida), sistem ini dapat diarahkan ke hampir semua lokus dalam genom asalkan terdapat urutan PAM (*Protospacer Adjacent Motif*, 5'-NGG-3' untuk Cas9 dari S. pyogenes) di dekat target (Hsu *et al*., 2014).

Keunggulan CRISPR-Cas9 dibandingkan teknologi *gene editing* sebelumnya (*Zinc Finger Nuclease*/ZFN dan TALEN) mencakup kemudahan desain dan sintesis sgRNA, efisiensi editing yang tinggi, kemampuan *multiplex editing* (menarget beberapa gen secara simultan), dan biaya yang jauh lebih rendah. Teknologi ini telah berhasil diterapkan pada berbagai spesies ikan termasuk zebrafish (Danio rerio), nila, lele, salmon, ikan trout, dan patin (Edvardsen *et al*., 2014; Dong *et al*., 2019).

Gambar 6. Skema Mekanisme Kerja CRISPR-Cas9 dalam Penyuntingan Gen Ikan Budidaya




Gambar 6 menjelaskan mekanisme kerja teknologi CRISPR-Cas9 dalam proses penyuntingan gen pada sel ikan, mulai dari tahap desain RNA hingga hasil akhir berupa perubahan genetik yang terarah. Sistem ini bekerja dengan memanfaatkan kompleks protein dan RNA untuk mengenali, memotong, serta memodifikasi urutan DNA pada lokasi spesifik di dalam genom. Gambar tersebut menunjukkan bahwa CRISPR-Cas9 bekerja sebagai sistem penyuntingan gen yang sangat presisi, efisien, dan fleksibel. Dalam konteks akuakultur, teknologi ini membuka peluang besar untuk menghasilkan ikan dengan sifat unggul seperti pertumbuhan lebih cepat, ketahanan penyakit yang lebih tinggi,

serta efisiensi pakan yang lebih baik melalui modifikasi langsung pada tingkat genom.

## 1. Mekanisme Molekuler dan Variasi Sistem CRISPR dalam Ikan

Teknologi *CRISPR-Cas9* merupakan sistem penyuntingan genom yang bekerja dengan cara mengenali dan memotong urutan asam deoksiribonukleat pada lokasi spesifik di dalam genom. Sistem ini terdiri atas kompleks ribonukleoprotein yang dibentuk oleh protein Cas9 dan *single guide ribonucleic acid*. *Single guide ribonucleic acid* berfungsi sebagai penentu spesifisitas karena memiliki urutan yang komplementer terhadap target asam deoksiribonukleat, sedangkan protein Cas9 bertindak sebagai enzim endonuklease yang memotong kedua untai asam deoksiribonukleat pada lokasi target. Mekanisme ini memungkinkan modifikasi genetik dilakukan secara terarah dan presisi tinggi, sehingga sangat potensial untuk aplikasi pemuliaan dan rekayasa genetik pada ikan (Doudna & Charpentier, 2012; Hsu et al., 2014).

Setelah terjadi pemotongan pada asam deoksiribonukleat, sel ikan akan mengaktifkan mekanisme perbaikan alami untuk memperbaiki kerusakan tersebut. Terdapat dua jalur utama perbaikan yang umum terjadi, yaitu *Non-Homologous End Joining* dan *Homology-Directed Repair*. Jalur *Non-Homologous End Joining* bekerja dengan menyambungkan kembali ujung asam deoksiribonukleat yang terputus secara langsung, namun proses ini sering menghasilkan kesalahan berupa sisipan atau penghapusan basa yang dikenal sebagai *insertions* dan *deletions*. Perubahan ini dapat menyebabkan hilangnya fungsi gen atau *gene knockout*. Sebaliknya, jalur *Homology-Directed Repair* menggunakan cetakan asam deoksiribonukleat donor untuk memperbaiki kerusakan secara lebih presisi sehingga memungkinkan penyisipan gen baru atau *gene knock-in* dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Perkembangan teknologi *CRISPR* tidak berhenti pada sistem *CRISPR-Cas9* konvensional saja. Inovasi terbaru telah menghasilkan teknik *base editing* yang memungkinkan perubahan satu basa nukleotida secara langsung tanpa memotong kedua untai asam deoksiribonukleat, sehingga mengurangi risiko kesalahan perbaikan. Selain itu, terdapat juga teknologi *prime editing* yang memberikan kemampuan lebih fleksibel untuk melakukan insersi, delesi, maupun substitusi nukleotida dengan tingkat presisi yang lebih tinggi. Kedua pendekatan ini

menawarkan keunggulan signifikan karena tidak bergantung pada pemutusan ganda asam deoksiribonukleat, sehingga meminimalkan efek *off-target* yang dapat memengaruhi stabilitas genom ikan.

Dalam konteks akuakultur, variasi sistem *CRISPR* ini membuka peluang besar untuk pengembangan sifat unggul pada ikan budidaya, seperti peningkatan pertumbuhan, ketahanan terhadap penyakit, dan efisiensi pemanfaatan pakan. Dengan kemampuan untuk memodifikasi gen secara presisi, teknologi ini menjadi salah satu alat paling kuat dalam rekayasa genetika modern. Namun demikian, penerapannya tetap memerlukan kajian mendalam terkait stabilitas genetik, efek jangka panjang, serta aspek biosafety sebelum dapat diimplementasikan secara luas dalam industri akuakultur (Doudna & Charpentier, 2012; Hsu et al., 2014).

## 2. Aplikasi CRISPR-Cas9 dalam Rekayasa Sifat Unggul Ikan

Aplikasi *CRISPR-Cas9* dalam akuakultur telah membuka peluang besar untuk meningkatkan sifat-sifat ekonomi penting secara langsung pada tingkat genom dengan presisi tinggi. Salah satu fokus utama penerapannya adalah peningkatan laju pertumbuhan melalui pengeditan gen yang terlibat dalam regulasi hormon pertumbuhan, metabolisme energi, serta jalur endokrin yang mengontrol pembentukan jaringan tubuh. Dengan menonaktifkan gen yang berfungsi sebagai inhibitor pertumbuhan atau memodifikasi gen regulator metabolisme, ikan dapat menunjukkan peningkatan efisiensi konversi pakan dan percepatan pertumbuhan tanpa perlu memasukkan gen asing dari spesies lain. Pendekatan ini menjadikan perbaikan sifat lebih terarah karena memanfaatkan modifikasi gen endogen yang sudah ada dalam genom ikan.

Selain peningkatan pertumbuhan, *CRISPR-Cas9* juga banyak diaplikasikan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit yang menjadi salah satu tantangan utama dalam sistem akuakultur intensif. Teknologi ini memungkinkan penargetan gen yang berperan dalam interaksi antara patogen dan inang, seperti reseptor yang digunakan virus untuk masuk ke sel atau komponen penting dalam jalur respons imun. Dengan mengubah atau menonaktifkan gen tertentu, ikan dapat menjadi lebih resisten terhadap infeksi bakteri, virus, maupun parasit. Strategi ini tidak hanya meningkatkan tingkat kelangsungan hidup, tetapi juga

mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik dan bahan kimia dalam pengendalian penyakit.

Aplikasi lain yang semakin penting adalah pengembangan ikan steril melalui pengeditan gen yang berperan dalam perkembangan sel germinal. Dengan menonaktifkan gen kunci yang terlibat dalam pembentukan gonad atau gamet, ikan dapat dibuat tidak mampu bereproduksi. Teknologi ini memiliki manfaat ekologis dan ekonomis karena dapat mencegah reproduksi tidak terkendali apabila ikan lepas ke lingkungan alami serta mengalihkan energi metabolik dari proses reproduksi ke pertumbuhan somatik. Hal ini secara langsung dapat meningkatkan efisiensi produksi dalam sistem budidaya.

Secara keseluruhan, *CRISPR-Cas9* menjadi fondasi penting dalam pengembangan generasi baru rekayasa genetika ikan yang lebih presisi, cepat, dan efisien. Teknologi ini memungkinkan modifikasi sifat unggul dilakukan secara langsung pada tingkat genom tanpa proses seleksi konvensional yang memakan waktu lama. Dengan berbagai aplikasi tersebut, *CRISPR-Cas9* memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan akuakultur modern yang lebih produktif, tahan penyakit, dan berkelanjutan, meskipun tetap diperlukan kajian biosafety dan evaluasi dampak jangka panjang sebelum implementasi skala luas.

## D. Potensi dan Resiko *Gene Editing*

Potensi aplikasi *gene editing* dalam akuakultur sangat luas dan menjanjikan. Beberapa contoh aplikasi yang sedang aktif diteliti meliputi: (1) *knockout gen myostatin* untuk meningkatkan massa otot dan laju pertumbuhan pada salmon dan ikan nila (Zhong *et al*., 2016), (2) modifikasi gen IgM untuk meningkatkan respons imun terhadap patogen spesifik, (3) penghapusan gen yang terkait dengan kematangan seksual dini untuk mencegah reproduksi pada ikan yang lolos ke alam, (4) pengenalan alel resistensi penyakit yang diidentifikasi dari populasi liar ke dalam strain budidaya, dan (5) modifikasi komposisi asam lemak untuk meningkatkan kandungan omega-3 dalam produk ikan (Dong *et al*., 2019).

Risiko yang perlu mendapat perhatian serius dalam pengembangan ikan *gene-edited* meliputi risiko *off-target effects* pemotongan DNA di lokasi yang tidak diinginkan yang dapat menyebabkan mutasi yang tidak terprediksi. Meskipun teknologi sgRNA

*design* yang semakin canggih dan varian Cas9 *high-fidelity* (HiFi Cas9, eSpCas9) telah mengurangi frekuensi *off-target editing* secara signifikan, verifikasi menyeluruh melalui *whole-genome sequencing* tetap diperlukan sebelum *strain gene-edited* dapat dipertimbangkan untuk produksi komersial (Tsai & Joung, 2016).

## 1. Potensi Aplikasi *Gene Editing* dalam Peningkatan Sifat Akuakultur

Teknologi *gene editing* menawarkan peluang yang sangat luas untuk merekayasa sifat-sifat unggul pada ikan budidaya secara presisi dan terarah. Salah satu aplikasi paling menonjol adalah *knockout gen myostatin*, yaitu gen yang berperan sebagai regulator negatif pertumbuhan otot. Dengan menonaktifkan gen ini, ikan dapat mengalami peningkatan massa otot dan laju pertumbuhan secara signifikan, sebagaimana telah ditunjukkan pada beberapa spesies seperti ikan nila dan salmon (Zhong *et al*., 2016). Pendekatan ini memberikan alternatif yang lebih presisi dibanding seleksi konvensional karena langsung menargetkan jalur biologis utama pertumbuhan.

Selain peningkatan pertumbuhan, *gene editing* juga memiliki potensi besar dalam peningkatan sistem imun ikan melalui modifikasi gen yang terlibat dalam respons antibodi, seperti IgM, atau komponen jalur imun bawaan. Hal ini memungkinkan ikan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap infeksi patogen spesifik yang umum ditemukan dalam sistem budidaya intensif. Aplikasi lain yang juga berkembang adalah pengendalian reproduksi melalui penghapusan gen yang berperan dalam kematangan seksual, sehingga menghasilkan ikan steril yang aman bagi lingkungan jika terjadi pelepasan tidak sengaja. Selain itu, gene editing juga digunakan untuk biofortifikasi produk perikanan, seperti peningkatan kandungan asam lemak omega-3, yang memiliki nilai nutrisi tinggi bagi kesehatan manusia (Dong *et al*., 2019).

## 2. Risiko, Batasan, dan Tantangan Etis Gene Editing

Meskipun memiliki potensi besar, penerapan gene editing dalam akuakultur juga membawa sejumlah risiko ilmiah, ekologis, dan etis yang perlu diperhatikan secara serius. Salah satu risiko utama adalah *off-target effects*, yaitu terjadinya pemotongan DNA pada lokasi genom yang tidak diinginkan. Efek ini dapat menghasilkan mutasi yang tidak terprediksi dan berpotensi mengganggu fungsi gen penting lainnya,

sehingga menimbulkan konsekuensi biologis yang sulit diperkirakan (Tsai & Joung, 2016).

Meskipun perkembangan teknologi seperti *high-fidelity Cas9* (HiFi Cas9) dan *enhanced specificity Cas9* (eSpCas9) telah meningkatkan akurasi editing secara signifikan, risiko *off-target* belum sepenuhnya dapat dihilangkan. Oleh karena itu, validasi genom secara menyeluruh melalui *whole-genome sequencing* menjadi langkah wajib sebelum organisme hasil *gene editing* dapat digunakan dalam skala komersial. Selain aspek teknis, terdapat pula tantangan etis dan regulasi terkait penerimaan publik, keamanan pangan, serta potensi dampak ekologis jika ikan hasil rekayasa genetik masuk ke ekosistem alami. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan gene editing tidak hanya membutuhkan kemajuan teknologi, tetapi juga kerangka regulasi dan biosekuriti yang ketat dan berkelanjutan.

## E. Regulasi Global Rekayasa Genetik

Regulasi terhadap produk rekayasa genetika, termasuk ikan transgenik dan *gene-edited*, sangat bervariasi antar negara, mencerminkan perbedaan pendekatan terhadap risiko, nilai-nilai sosial, dan tradisi regulasi yang berbeda. Amerika Serikat mengatur ikan transgenik sebagai *'new animal drug'* di bawah wewenang FDA, dengan proses persetujuan yang sangat panjang dan ketat (FDA, 2015). Uni Eropa mengambil pendekatan yang lebih restriktif, di mana semua organisme *gene-edited* dianggap sebagai GMO dan tunduk pada regulasi yang sama ketatnya dengan tanaman transgenik (CJEU, 2018).

Di Indonesia, pengaturan organisme hasil rekayasa genetika (OHRG) diatur melalui beberapa peraturan perundang-undangan, termasuk Peraturan Pemerintah No. 21 Tahun 2005 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetika dan regulasi sektoral dari Kementerian Kelautan dan Perikanan. Komisi Keamanan Hayati (KKH) bertanggung jawab untuk melakukan kajian keamanan hayati sebelum OHRG dapat dilepas secara komersial (KKH, 2019).

Tabel 9. Perbandingan Kerangka Regulasi Rekayasa Genetika Ikan di Berbagai Negara/Wilayah

| **Wilayah/Negara** | **Kerangka Regulasi** | **Pendekatan** | **Status Ikan *Gene-Edited*** |
|---|---|---|---|
| Amerika Serikat | FDA (FFDCA) | Produk berbasis (*product-based*) | *Case-by-case review* |
| Uni Eropa | Directive 2001/18/EC | Proses berbasis (*process-based*) | Diatur sebagai GMO |
| Brasil | CTNBio | Produk berbasis | Beberapa sudah disetujui |
| Jepang | MHLW + MAFF | Bertahap, fleksibel | SDN-1 tidak perlu notifikasi |
| Australia/NZ | OGTR + FSANZ | Produk berbasis (bertahap) | SDN-1 dikecualikan regulasi |
| Indonesia | KKH + BPOM | Proses berbasis (umum) | Dalam pengembangan regulasi |
| Kanada | HC + CFIA | Produk berbasis (novel traits) | Diatur berdasarkan kebaruan sifat |

Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa regulasi rekayasa genetika ikan tidak bersifat seragam secara global, melainkan sangat dipengaruhi oleh pendekatan kebijakan masing-masing negara. Perbedaan antara pendekatan berbasis proses dan berbasis produk menjadi faktor utama yang menentukan apakah ikan gene-edited dapat segera diadopsi secara komersial atau harus melalui proses evaluasi yang panjang dan ketat. Kondisi ini berdampak langsung pada laju inovasi, investasi industri akuakultur, serta transfer teknologi bioteknologi perikanan di tingkat internasional.

## 1. Kerangka Regulasi dan Perbandingan Internasional

Regulasi terhadap produk rekayasa genetika, termasuk ikan transgenik maupun organisme hasil *gene editing*, menunjukkan variasi yang sangat besar antar negara. Perbedaan ini mencerminkan keragaman pendekatan ilmiah, filosofi risiko, serta nilai sosial dan etika yang dianut oleh masing-masing yurisdiksi. Secara umum, terdapat dua pendekatan utama yang mendominasi regulasi global, yaitu *product-based regulation* (berbasis karakteristik produk akhir) dan *process-based regulation* (berbasis metode atau proses teknologi yang digunakan). Amerika Serikat menerapkan pendekatan *product-based* melalui pengawasan *Food and Drug Administration* (FDA) berdasarkan *Federal Food, Drug, and Cosmetic Act* (FFDCA). Dalam sistem ini, ikan transgenik diperlakukan sebagai "*new animal drug*", sehingga setiap produk dievaluasi secara *case-by-case*. Fokus penilaian meliputi keamanan pangan, dampak lingkungan, serta stabilitas genetik organisme hasil rekayasa (FDA, 2015). Pendekatan ini memberikan fleksibilitas tinggi, namun tetap mempertahankan standar evaluasi yang ketat sebelum komersialisasi.

Berbeda dengan itu, Uni Eropa menggunakan pendekatan *process-based* yang lebih restriktif melalui *Directive* 2001/18/EC. Dalam kerangka ini, semua organisme hasil *gene editing*, termasuk teknologi modern seperti CRISPR, umumnya dikategorikan sebagai GMO. Putusan *Court of Justice of the European Union* (CJEU) tahun 2018 memperkuat bahwa teknik mutagenesis modern tetap berada dalam cakupan regulasi GMO, sehingga proses persetujuan menjadi sangat ketat dan kompleks, serta berdampak pada rendahnya adopsi komersial di wilayah tersebut. Di Brasil, pengawasan dilakukan oleh CTNBio dengan pendekatan yang lebih dekat ke *product-based regulation*. Evaluasi difokuskan pada karakteristik biologis akhir dari organisme hasil rekayasa genetika, bukan semata-mata pada metode pembuatannya. Beberapa produk telah memperoleh persetujuan untuk aplikasi tertentu, menunjukkan tingkat fleksibilitas yang relatif lebih tinggi dibandingkan Uni Eropa.

Jepang menunjukkan pendekatan yang lebih adaptif melalui koordinasi *Ministry of Health, Labour and Welfare* (MHLW) serta *Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries* (MAFF). Dalam kebijakan ini, beberapa produk *gene editing* khususnya tipe SDN-1 yang tidak melibatkan DNA asing dapat dikecualikan dari regulasi GMO

formal, sehingga membuka ruang inovasi yang lebih besar dalam bioteknologi perikanan. Australia dan Selandia Baru mengadopsi sistem yang dikelola oleh OGTR dan FSANZ dengan pendekatan *product-based* yang bersifat bertahap. Dalam beberapa kasus, organisme hasil *gene editing* tertentu dapat dikecualikan dari regulasi GMO tergantung pada jenis perubahan genetik yang dihasilkan, sehingga menciptakan keseimbangan antara inovasi dan perlindungan biosafety.

Di Indonesia, regulasi organisme hasil rekayasa genetika diatur melalui Komisi Keamanan Hayati (KKH), BPOM, serta Peraturan Pemerintah No. 21 Tahun 2005 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetika. Pendekatan yang digunakan masih didominasi *process-based regulation* dengan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*), sehingga setiap produk wajib melalui evaluasi keamanan hayati sebelum dapat dilepas secara komersial. Kanada menggunakan pendekatan *novel traits-based regulation* melalui *Health Canada* (HC) dan *Canadian Food Inspection Agency* (CFIA). Fokus regulasi tidak pada metode rekayasa genetika, tetapi pada apakah organisme tersebut memiliki sifat baru yang belum ada pada organisme konvensional. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas tinggi untuk inovasi, selama aspek keamanan tetap terpenuhi.

Perbedaan pendekatan regulasi di berbagai negara menciptakan lanskap global yang tidak seragam dalam pengembangan dan komersialisasi ikan hasil rekayasa genetika. Negara dengan pendekatan *product-based* cenderung lebih cepat dalam mengadopsi inovasi bioteknologi, sedangkan pendekatan *process-based* lebih menekankan prinsip kehati-hatian sehingga proses persetujuan lebih panjang dan ketat. Kondisi ini berpengaruh langsung terhadap arah inovasi, investasi industri, serta perdagangan global produk akuakultur berbasis bioteknologi.

## 2. Implikasi Regulasi terhadap Inovasi, Industri, dan Perdagangan Akuakultur

Perbedaan pendekatan regulasi rekayasa genetika di berbagai negara tidak hanya bersifat administratif, tetapi juga memiliki dampak langsung terhadap arah inovasi bioteknologi akuakultur global. Negara dengan sistem *product-based regulation* umumnya lebih adaptif terhadap perkembangan teknologi seperti CRISPR dan *gene editing* karena fokus penilaian berada pada karakteristik akhir organisme, bukan

pada metode yang digunakan. Hal ini mempercepat proses translasi riset ke tahap komersial, sehingga mendorong investasi swasta dan percepatan hilirisasi teknologi. Sebaliknya, negara dengan pendekatan *process-based regulation* cenderung menerapkan prinsip kehati-hatian yang lebih ketat. Meskipun pendekatan ini memberikan tingkat perlindungan biosafety yang tinggi, proses evaluasi yang panjang dan kompleks dapat memperlambat adopsi inovasi. Dalam konteks industri akuakultur, kondisi ini sering kali menciptakan kesenjangan teknologi antara negara maju dengan regulasi fleksibel dan negara yang lebih konservatif.

Perbedaan regulasi juga berdampak signifikan terhadap perdagangan internasional produk perikanan. Ikan hasil rekayasa genetika atau *gene editing* yang telah disetujui di satu negara belum tentu dapat diterima di negara lain karena perbedaan standar keamanan pangan dan definisi GMO. Situasi ini menciptakan hambatan non-tarif (*non-tariff barriers*) yang dapat membatasi ekspor, meskipun secara ilmiah produk tersebut telah dinyatakan aman di negara asalnya. Selain itu, isu *traceability* menjadi semakin penting dalam rantai pasok global akuakultur modern. Sistem pelacakan (*traceability system*) diperlukan untuk memastikan bahwa produk dapat diidentifikasi asal-usul genetiknya, termasuk apakah berasal dari organisme transgenik, *gene-edited*, atau konvensional. Hal ini penting untuk memenuhi tuntutan regulasi lintas negara serta meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap keamanan pangan.

Dari perspektif industri, ketidakseragaman regulasi global juga memengaruhi strategi investasi perusahaan bioteknologi perikanan. Perusahaan cenderung memilih negara dengan regulasi yang lebih jelas, cepat, dan adaptif sebagai lokasi pengembangan dan uji coba produk. Akibatnya, terjadi konsentrasi inovasi di wilayah tertentu, sementara negara dengan regulasi ketat berisiko tertinggal dalam pengembangan teknologi akuakultur modern. Ke depan, harmonisasi regulasi internasional menjadi kebutuhan strategis untuk mengurangi fragmentasi kebijakan global. Upaya ini dapat dilakukan melalui kerja sama antar lembaga internasional, penyusunan standar biosafety bersama, serta penguatan peran organisasi seperti FAO dan Codex Alimentarius dalam menetapkan pedoman global untuk produk akuakultur berbasis rekayasa genetika. Dengan demikian, inovasi dapat terus berkembang tanpa

mengabaikan aspek keamanan hayati, etika, dan keberlanjutan lingkungan.



# BAB VIII
# BIOTEKNOLOGI UNTUK KETAHANAN PENYAKIT DAN ADAPTASI LINGKUNGAN

## A. Gen Resistensi Penyakit pada Ikan

Ketahanan ikan terhadap penyakit merupakan sifat kompleks yang dikendalikan oleh banyak gen yang tersebar di seluruh genom, dan sangat dipengaruhi oleh interaksi antara genotip inang, patogen, dan kondisi lingkungan. Pemahaman tentang genetik dasar ketahanan penyakit pada ikan telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir, didorong oleh kemajuan teknologi genomik yang memungkinkan identifikasi Gen dan wilayah genomik yang berkontribusi pada variasi resistensi antar individu (Yáñez *et al*., 2023).

Sejumlah gen dan wilayah genomik yang terkait dengan ketahanan penyakit pada ikan telah diidentifikasi melalui studi GWAS dan QTL mapping. Pada salmon Atlantik, sebuah QTL mayor pada kromosom 3 dijelaskan oleh gen BHMT2 (*Betaine-Homocysteine Methyltransferase 2*) yang mempengaruhi ketahanan terhadap *Salmon Rickettsial Syndrome* (SRS), penyakit bakteri paling destruktif di industri salmon Chili (Yáñez *et al*., 2016). Pada ikan nila, QTL yang berhubungan dengan ketahanan terhadap *Streptococcus agalactiae* dan *Flavobacterium columnare* telah diidentifikasi dan sebagian telah divalidasi secara fungsional (Palaiokostas *et al*., 2016).

*Major Histocompatibility Complex* (MHC) merupakan gugus gen yang paling banyak dipelajari dalam konteks imunogenetika ikan. Gen-gen MHC mengkode protein yang berperan dalam presentasi antigen kepada sel-sel T limfosit dan merupakan determinan utama kemampuan sistem imun adaptif dalam mengenali dan merespons patogen. Polimorfisme yang tinggi pada gen-gen MHC ikan berkaitan dengan spektrum patogen yang lebih luas yang dapat direspon, memberikan keunggulan evolusioner dalam lingkungan dengan tekanan patogen yang beragam (Bernatchez & Landry, 2003).

Tabel 10. Gen dan QTL Terkait Ketahanan Penyakit pada Berbagai Spesies Ikan dan Udang Budidaya

| **Penyakit** | **Patogen** | **Spesies Ikan** | **Gen/QTL Terkait Resistensi** |
|---|---|---|---|
| ISA (*Infectious Salmon Anemia*) | ISA virus (*Orthomyxoviridae*) | Salmon Atlantik | QTL chr 3, 13; IFNA gen |
| SRS (*Salmon Rickettsial Syndrome*) | *Piscirickettsia salmonis* | Salmon, Trout | QTL chr 3 (BHMT2 region) |
| Koi Herpesvirus (KHV) | CyHV-3 | Ikan mas, Koi | QTL chr 23, 31 |
| *Streptococcosis* | *Streptococcus agalactiae* | Nila (O. niloticus) | QTL chr 5 (TRIM region) |
| *Columnaris disease* | *Flavobacterium columnare* | Catfish, Nila | QTL chr 14 |
| VHS (*Viral Hemorrhagic Septicemia*) | VHS virus | Berbagai spesies | MHC Class I region |
| WSSV (*White Spot Syndrome*) | WSSV (*Nimaviridae*) | Udang (Penaeus sp.) | WSSV-resistance QTL |

Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa ketahanan penyakit pada organisme akuatik dikendalikan oleh kombinasi gen spesifik, QTL, serta sistem imun kompleks yang melibatkan interaksi antara respons imun bawaan dan adaptif. Identifikasi wilayah genomik ini memberikan dasar penting bagi pengembangan seleksi berbasis marker (MAS) dan *genomic selection* untuk menghasilkan strain ikan dan udang yang lebih tahan terhadap penyakit utama dalam industri akuakultur.

## 1. Gen *Imunitas Innate* pada Ikan

Imunitas *innate* atau imunitas bawaan merupakan garis pertahanan pertama pada ikan yang bekerja secara cepat dan tidak spesifik terhadap patogen. Sistem ini melibatkan berbagai gen yang mengatur pengenalan patogen, aktivasi respons inflamasi, serta eliminasi mikroorganisme yang masuk ke dalam tubuh. Gen-gen yang berperan dalam imunitas *innate* umumnya bersifat konservatif, namun menunjukkan variasi alelik yang signifikan antar individu dan populasi yang berpengaruh terhadap tingkat resistensi penyakit (Secombes, 2011). Salah satu kelompok gen penting dalam imunitas *innate* adalah *Toll-like receptors* (TLRs), yang berfungsi mengenali *pathogen-associated molecular patterns* (PAMPs) seperti lipopolisakarida (LPS) bakteri atau RNA virus. Aktivasi TLR akan memicu jalur sinyal intraseluler yang menghasilkan produksi sitokin pro-inflamasi dan interferon. Variasi genetik pada TLR1, TLR3, TLR5, dan TLR9 telah dikaitkan dengan perbedaan respons imun pada berbagai spesies ikan budidaya.

Selain TLR, gen interferon (IFN), termasuk IFNA dan *interferon regulatory factors* (IRF), memainkan peran sentral dalam respons antiviral. Pada salmon Atlantik, variasi pada jalur interferon terbukti berkorelasi dengan tingkat ketahanan terhadap *Infectious Salmon Anemia* (ISA), menunjukkan pentingnya aktivasi respons antiviral awal dalam menekan replikasi virus (Yáñez et al., 2016). Gen lain yang juga penting adalah keluarga TRIM (*Tripartite Motif*), yang berperan dalam mekanisme ubiquitinasi protein untuk degradasi patogen intraseluler. Pada ikan nila, gen TRIM tertentu telah diidentifikasi sebagai kandidat utama dalam ketahanan terhadap *Streptococcus agalactiae*, menunjukkan bahwa regulasi protein seluler memiliki kontribusi besar terhadap resistensi bakteri. Secara keseluruhan, gen-gen imunitas *innate* memberikan kontribusi utama dalam menentukan kemampuan awal ikan

untuk bertahan terhadap infeksi, dan menjadi target penting dalam seleksi berbasis marker (MAS) untuk peningkatan ketahanan penyakit.

## 2. Gen Imunitas Adaptif dan *Major Histocompatibility Complex* (MHC)

Imunitas adaptif pada ikan melibatkan respons imun yang lebih spesifik dan memiliki memori imunologis, meskipun tidak sekompleks vertebrata tingkat tinggi seperti mamalia. Komponen utama sistem ini adalah *Major Histocompatibility Complex* (MHC), yang berperan dalam presentasi antigen kepada sel T untuk memicu respons imun spesifik terhadap patogen (Bernatchez & Landry, 2003). Gen MHC Class I bertanggung jawab dalam presentasi antigen endogen, terutama yang berasal dari infeksi virus di dalam sel. Aktivasi MHC Class I sangat penting dalam respons terhadap penyakit viral seperti *Viral Hemorrhagic Septicemia* (VHS), di mana variasi alelik pada gen ini menentukan efisiensi pengenalan antigen oleh sistem imun adaptif ikan.

Sementara itu, MHC Class II berperan dalam presentasi antigen eksogen yang berasal dari bakteri atau parasit. Aktivasi jalur ini berkaitan dengan respons terhadap penyakit bakteri seperti *columnaris disease* dan *streptococcosis*. Tingkat polimorfisme yang tinggi pada gen MHC memungkinkan ikan memiliki spektrum pengenalan patogen yang lebih luas, sehingga meningkatkan peluang bertahan hidup dalam lingkungan dengan tekanan penyakit tinggi. Selain MHC, gen imunoglobulin seperti IgM juga berperan penting dalam sistem imun adaptif ikan. IgM merupakan antibodi utama yang diproduksi sebagai respons terhadap infeksi awal dan menjadi indikator penting dalam studi vaksinasi dan respons imun protektif. Dengan demikian, variasi genetik pada sistem imunitas adaptif menjadi dasar penting dalam pengembangan strain ikan yang memiliki ketahanan jangka panjang terhadap berbagai patogen melalui pendekatan seleksi genetik dan vaksinasi terarah.

## 3. QTL dan Marker Genetik Ketahanan Penyakit

Ketahanan penyakit pada ikan umumnya merupakan sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen dengan kontribusi kecil hingga besar yang tersebar di berbagai kromosom. Wilayah genomik yang berkontribusi terhadap variasi sifat ini dikenal sebagai *Quantitative Trait Loci* (QTL), yang dapat diidentifikasi melalui analisis *linkage*

*mapping* maupun *Genome-Wide Association Study* (GWAS) (Yáñez et al., 2023). Pada salmon Atlantik, QTL utama untuk ketahanan terhadap *Salmon Rickettsial Syndrome* (SRS) ditemukan pada kromosom 3 dengan kandidat gen BHMT2. Pada penyakit *Infectious Salmon Anemia* (ISA), beberapa QTL ditemukan pada kromosom 3 dan 13, yang berasosiasi dengan regulasi interferon. Temuan ini menunjukkan bahwa ketahanan terhadap penyakit viral dan bakteri sering kali melibatkan beberapa wilayah genom sekaligus.

Pada ikan nila (*Oreochromis niloticus*), QTL pada kromosom 5 telah dikaitkan dengan ketahanan terhadap *Streptococcus agalactiae*, khususnya pada wilayah yang mengandung gen TRIM. Sementara itu, pada penyakit *columnaris*, QTL pada kromosom 14 diduga berhubungan dengan respons imun mukosa dan integritas jaringan epitel. Pada ikan mas dan koi, ketahanan terhadap *Koi Herpesvirus* (KHV) dikaitkan dengan QTL pada kromosom 23 dan 31. Sedangkan pada udang (*Penaeus* spp.), resistensi terhadap *White Spot Syndrome Virus* (WSSV) bersifat poligenik dan melibatkan beberapa wilayah genom yang belum sepenuhnya teridentifikasi. Identifikasi QTL dan marker genetik ini memiliki implikasi besar dalam pemuliaan ikan modern karena memungkinkan penerapan *marker-assisted selection* (MAS) dan *genomic selection* (GS). Dengan pendekatan ini, seleksi individu unggul dapat dilakukan lebih awal tanpa harus menunggu ekspresi fenotipik penyakit, sehingga meningkatkan efisiensi dan akurasi program pemuliaan secara signifikan.

## B. Imunogenetika Akuakultur

Imunogenetika adalah cabang ilmu yang mempelajari dasar genetik dari respons imun. Sistem imun ikan terdiri dari dua komponen utama yang bekerja secara sinergistik: sistem imun bawaan (*innate immunity*) yang merupakan lini pertahanan pertama yang cepat namun tidak spesifik, dan sistem imun adaptif (*adaptive immunity*) yang spesifik terhadap antigen dan memiliki kemampuan memori imunologis (Magnadóttir, 2006).

Komponen genetik dari sistem imun innate pada ikan mencakup *Pattern Recognition Receptors* (PRRs) seperti *Toll-Like Receptors* (TLRs), *NOD-like Receptors* (NLRs), dan *RIG-I-like Receptors* (RLRs) yang mengenali *Pathogen-Associated Molecular Patterns* (PAMPs)

pada permukaan atau di dalam patogen. Variasi genetik dalam gen-gen yang mengkode PRRs telah terbukti mempengaruhi tingkat resistensi ikan terhadap berbagai patogen (Quiniou *et al*., 2013).

Vaksinasi merupakan strategi pengendalian penyakit yang sangat penting dalam akuakultur intensif, dan responsivitas terhadap vaksin juga memiliki komponen genetik yang signifikan. Ikan dengan genotip MHC tertentu telah terbukti memberikan respons imun yang lebih baik terhadap vaksin spesifik, membuka kemungkinan seleksi untuk *'vaccine responsiveness'* sebagai karakter pemuliaan tambahan. Integrasi vaksinasi dan pemuliaan untuk ketahanan penyakit merupakan strategi biosecurity yang komprehensif dan sinergistik (Shinn *et al*., 2015).

## 1. Sistem Imun Bawaan dan Variasi Gen PRR pada Ikan

Sistem imun bawaan (*innate immunity*) merupakan komponen pertama dan tercepat dalam pertahanan tubuh ikan terhadap infeksi patogen. Sistem ini bekerja secara non-spesifik dengan mengenali struktur molekuler konservatif pada patogen yang disebut *pathogen-associated molecular patterns* (PAMPs). Pengenalan ini dimediasi oleh kelompok protein yang disebut *pattern recognition receptors* (PRRs), yang secara genetik dikodekan oleh berbagai gen penting dalam sistem imun ikan (Magnadóttir, 2006). Kelompok PRR yang paling banyak diteliti dalam imunogenetika akuakultur adalah *Toll-like receptors* (TLRs), *NOD-like receptors* (NLRs), dan *RIG-I-like receptors* (RLRs). TLR berperan dalam mendeteksi komponen patogen ekstraseluler seperti lipopolisakarida (LPS) bakteri, flagelin, serta asam nukleat virus. Sementara itu, NLR lebih banyak berperan dalam deteksi patogen intraseluler dan regulasi inflamasi, sedangkan RLR berfungsi khusus dalam deteksi RNA virus di sitoplasma sel.

Variasi genetik pada keluarga gen PRR ini memiliki dampak langsung terhadap sensitivitas dan kecepatan respons imun ikan. Polimorfisme pada gen TLR3, TLR5, dan TLR9, misalnya, telah dikaitkan dengan perbedaan tingkat resistensi terhadap infeksi virus dan bakteri pada beberapa spesies ikan budidaya. Individu dengan variasi alel tertentu menunjukkan aktivasi respons imun yang lebih cepat, sehingga mampu menekan replikasi patogen pada tahap awal infeksi. Dengan demikian, gen PRR merupakan komponen kunci dalam imunogenetika ikan dan menjadi target potensial dalam program seleksi genetik untuk meningkatkan ketahanan penyakit berbasis sistem imun bawaan.

## 2. Sistem Imun Adaptif, MHC, dan Respons Vaksin pada Ikan

Sistem imun adaptif pada ikan merupakan mekanisme pertahanan yang lebih spesifik dibandingkan imun bawaan, serta memiliki kemampuan membentuk memori imunologis. Komponen utama sistem ini adalah *Major Histocompatibility Complex* (MHC), yang berfungsi dalam proses presentasi antigen kepada sel T untuk mengaktivasi respons imun spesifik terhadap patogen (Bernatchez & Landry, 2003). Gen MHC Class I berperan dalam presentasi antigen endogen yang berasal dari patogen intraseluler seperti virus, sedangkan MHC Class II berperan dalam presentasi antigen eksogen yang berasal dari bakteri atau parasit. Tingkat polimorfisme yang tinggi pada gen MHC memungkinkan variasi kemampuan pengenalan antigen antar individu, yang secara langsung memengaruhi tingkat resistensi terhadap penyakit infeksi.

Selain MHC, komponen penting lain dalam sistem imun adaptif adalah imunoglobulin, khususnya IgM sebagai antibodi utama pada ikan. IgM berperan dalam netralisasi patogen dan aktivasi sistem komplemen, serta menjadi indikator utama dalam evaluasi respons imun setelah vaksinasi. Respons terhadap vaksin pada ikan juga memiliki dasar genetik yang kuat. Individu dengan genotip MHC tertentu menunjukkan respons antibodi yang lebih tinggi terhadap vaksin spesifik, sehingga efektivitas vaksin tidak hanya bergantung pada jenis vaksin, tetapi juga pada latar belakang genetik ikan. Fenomena ini membuka peluang pengembangan konsep "*vaccine responsiveness*" sebagai karakter seleksi baru dalam program pemuliaan ikan modern. Integrasi antara vaksinasi dan pemuliaan genetik memungkinkan pendekatan pengendalian penyakit yang lebih efektif, di mana peningkatan ketahanan penyakit tidak hanya dicapai melalui stimulasi imun, tetapi juga melalui peningkatan kapasitas genetik sistem imun adaptif ikan.

# C. Adaptasi Terhadap Perubahan Ikan

Perubahan iklim global yang ditandai dengan peningkatan suhu rata-rata, perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi kejadian ekstrem, dan pengasaman laut memberikan tekanan yang semakin besar terhadap sistem budidaya ikan di seluruh dunia. Proyeksi IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) memperkirakan

peningkatan suhu permukaan laut sebesar 1,5-4,5°C hingga akhir abad ke-21, tergantung pada skenario emisi yang terjadi (IPCC, 2021).

Respons fisiologis dan genetik ikan terhadap peningkatan suhu melibatkan serangkaian mekanisme molekuler yang kompleks, termasuk ekspresi *heat shock proteins* (HSPs), regulasi epigenetik, dan perubahan dalam metabolisme energi. Studi genomik komparatif antara populasi ikan dari habitat yang berbeda secara termal telah mengidentifikasi varian genetik yang berhubungan dengan toleransi suhu tinggi, memberikan kandidat gen dan marker untuk program pemuliaan ikan tahan panas (Jonsson & Jonsson, 2019).

Program pemuliaan untuk adaptasi iklim membutuhkan pendekatan yang mempertimbangkan skenario perubahan iklim jangka panjang. Evaluasi respons fenotipik dan genomik di bawah kondisi suhu yang meningkat secara bertahap, uji stres oksigen terlarut rendah (hipoksia), dan paparan terhadap kondisi asidik memberikan informasi yang berguna untuk identifikasi individu dan keluarga yang paling toleran. Pelestarian keragaman genetik tinggi merupakan strategi penting untuk mempertahankan kapasitas adaptasi populasi terhadap perubahan lingkungan yang tidak terduga (Mulder, 2016).

## 1. Mekanisme Genetik dan Fisiologis Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Adaptasi ikan terhadap perubahan iklim merupakan hasil interaksi kompleks antara mekanisme fisiologis, regulasi genetik, dan respons molekuler terhadap tekanan lingkungan. Peningkatan suhu, penurunan kadar oksigen terlarut, dan perubahan pH perairan memicu perubahan ekspresi gen yang berfungsi menjaga homeostasis seluler dan kelangsungan hidup organisme akuatik (Jonsson & Jonsson, 2019). Salah satu mekanisme utama dalam respons terhadap stres termal adalah ekspresi *heat shock proteins* (HSPs), seperti HSP70 dan HSP90, yang berfungsi sebagai chaperone molekuler untuk mencegah denaturasi protein dan membantu *refolding protein* yang rusak akibat suhu tinggi. Regulasi gen HSP dikontrol oleh *heat shock factors* (HSFs) yang aktif ketika terjadi perubahan suhu ekstrem, sehingga menjadi indikator penting toleransi termal pada ikan.

Selain HSP, adaptasi terhadap stres lingkungan juga melibatkan perubahan metabolisme energi melalui regulasi gen yang terlibat dalam respirasi seluler, termasuk gen pada jalur mitokondria. Ikan yang hidup

di lingkungan dengan oksigen rendah (hipoksia) menunjukkan peningkatan ekspresi gen *erythropoietin* (EPO) dan *hypoxia-inducible factors* (HIFs), yang membantu meningkatkan efisiensi penggunaan oksigen dan mempertahankan fungsi jaringan vital. Studi komparatif antar populasi ikan dari berbagai zona geografis juga menunjukkan adanya variasi alelik pada gen yang berhubungan dengan toleransi suhu dan stres oksidatif. Variasi ini menjadi dasar penting dalam seleksi genetik untuk menghasilkan strain ikan yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan ekstrem yang dipicu oleh perubahan iklim global.

## 2. Strategi Pemuliaan Genetik untuk Ketahanan Perubahan Iklim

Program pemuliaan ikan untuk menghadapi perubahan iklim memerlukan pendekatan yang bersifat prediktif, adaptif, dan berbasis data genomik. Strategi ini tidak hanya berfokus pada peningkatan produktivitas, tetapi juga pada peningkatan toleransi terhadap stres lingkungan seperti suhu tinggi, hipoksia, dan perubahan salinitas serta pH perairan (Mulder, 2016). Salah satu pendekatan utama adalah seleksi berbasis fenotipik dan genomik terhadap sifat toleransi stres. Ikan diuji dalam kondisi lingkungan terkontrol yang mensimulasikan skenario perubahan iklim, seperti peningkatan suhu bertahap atau penurunan oksigen terlarut. Individu yang mampu mempertahankan pertumbuhan dan kelangsungan hidup dalam kondisi tersebut dipilih sebagai kandidat induk untuk generasi berikutnya.

Selain itu, pendekatan *genomic selection* (GS) memungkinkan prediksi nilai genetik individu berdasarkan marker genomik yang terkait dengan toleransi stres lingkungan. Dengan memanfaatkan data SNP dan QTL, program pemuliaan dapat mempercepat seleksi individu unggul tanpa harus menunggu ekspresi fenotipik penuh di lingkungan ekstrem. Strategi lain yang sangat penting adalah konservasi keragaman genetik dalam populasi budidaya. Keragaman genetik yang tinggi memberikan fleksibilitas adaptif yang lebih besar terhadap perubahan lingkungan yang tidak dapat diprediksi. Oleh karena itu, pengelolaan breeding population harus menghindari inbreeding berlebihan dan menjaga variasi genetik sebagai cadangan evolusioner jangka panjang. Pendekatan terpadu antara seleksi genetik, evaluasi lingkungan, dan konservasi plasma nutfah menjadi kunci dalam membangun sistem akuakultur yang resilien terhadap dampak perubahan iklim global di masa depan.

## D. Pemuliaan untuk Toleransi Lingkungan Ekstrem

Di banyak kawasan budidaya tropis, termasuk Indonesia, ikan dihadapkan pada berbagai kondisi lingkungan yang dapat dianggap 'ekstrem' dari perspektif fisiologis suhu tinggi (>32°C), salinitas rendah atau tinggi, oksigen terlarut rendah, dan konsentrasi amonia yang fluktuatif. Kemampuan ikan untuk bertoleransi terhadap kondisi-kondisi ini merupakan faktor penting dalam menentukan keberhasilan budidaya di berbagai sistem produksi (Boyd *et al*., 2015).

Program pemuliaan untuk toleransi lingkungan ekstrem memerlukan protokol uji yang dirancang khusus untuk mengekspos ikan kandidat seleksi terhadap kondisi stres yang terkontrol dan terstandarisasi. *Critical Thermal Maximum* (CTmax) dan *Critical Thermal Minimum* (CTmin) merupakan parameter yang umum digunakan untuk mengukur toleransi termal. Untuk toleransi hipoksia, *Critical Oxygen Level* (COL) dan *Loss of Equilibrium* (LOE) *threshold* digunakan sebagai indikator ketahanan terhadap oksigen rendah (Claireaux & Chabot, 2016).

Studi-studi terkini menunjukkan bahwa toleransi termal dan toleransi hipoksia memiliki komponen genetik yang dapat direspons melalui seleksi. Penelitian pada ikan nila menunjukkan bahwa populasi yang berasal dari danau-danau di Afrika Timur yang memiliki kondisi hipoksia episodik menunjukkan kapasitas toleransi hipoksia yang secara genetik lebih tinggi dibandingkan populasi dari habitat yang lebih oksigenat. Informasi ini dimanfaatkan dalam seleksi strain nila yang adaptif untuk budidaya di tambak dengan manajemen oksigen yang terbatas (Palaiokostas *et al*., 2016).

### 1. Parameter Fisiologis dan Basis Genetik Toleransi Lingkungan Ekstrem

Toleransi ikan terhadap lingkungan ekstrem merupakan hasil dari kemampuan fisiologis dan adaptasi genetik yang memungkinkan organisme mempertahankan homeostasis dalam kondisi di luar kisaran optimalnya. Di lingkungan budidaya tropis, ikan sering menghadapi stres multifaktorial seperti suhu tinggi, fluktuasi salinitas, hipoksia, dan akumulasi senyawa toksik seperti amonia, yang secara langsung memengaruhi pertumbuhan dan kelangsungan hidup (Boyd *et al*., 2015). Pengukuran toleransi lingkungan ekstrem dilakukan melalui parameter

fisiologis terstandar. *Critical Thermal Maximum* (CTmax) dan *Critical Thermal Minimum* (CTmin) digunakan untuk mengukur batas atas dan bawah toleransi suhu ikan. Nilai CTmax menunjukkan suhu tertinggi yang masih dapat ditoleransi sebelum terjadi kegagalan fisiologis seperti kehilangan keseimbangan, sedangkan CTmin menunjukkan batas toleransi terhadap suhu rendah. Variasi nilai ini antar individu menunjukkan adanya dasar genetik yang dapat diseleksi dalam program pemuliaan.

Selain toleransi termal, kemampuan ikan dalam menghadapi kondisi oksigen rendah juga sangat penting. *Critical Oxygen Level* (COL) merupakan ambang batas konsentrasi oksigen terendah yang masih memungkinkan ikan mempertahankan fungsi fisiologis normal. Ketika oksigen turun di bawah ambang ini, ikan akan mengalami *Loss of Equilibrium* (LOE), yang menjadi indikator kegagalan sistem respirasi. Variasi individu dalam COL dan LOE menunjukkan adanya komponen heritabilitas yang dapat dimanfaatkan dalam seleksi genetik (Claireaux & Chabot, 2016). Secara molekuler, toleransi terhadap stres lingkungan ini melibatkan regulasi gen yang berhubungan dengan metabolisme energi, respons stres oksidatif, serta sistem respirasi seluler. Gen seperti HIF-1α (*Hypoxia-Inducible Factor*) dan berbagai *heat shock proteins* (HSPs) memainkan peran penting dalam mempertahankan fungsi sel di bawah tekanan lingkungan ekstrem.

## 2. Strategi Seleksi Genetik untuk Adaptasi Lingkungan Ekstrem pada Akuakultur

Pengembangan strain ikan yang toleran terhadap lingkungan ekstrem memerlukan strategi pemuliaan yang terintegrasi antara evaluasi fenotipik, pendekatan fisiologis, dan analisis genomik. Program seleksi dimulai dengan uji stres terkontrol untuk mengidentifikasi individu dengan performa terbaik dalam kondisi lingkungan yang meniru tantangan nyata di lapangan. Dalam konteks toleransi suhu, ikan diuji menggunakan metode peningkatan atau penurunan suhu bertahap untuk menentukan nilai CTmax dan CTmin. Individu yang mampu bertahan pada rentang suhu yang lebih luas dipilih sebagai kandidat induk. Pendekatan serupa juga diterapkan untuk toleransi hipoksia, di mana ikan diuji dalam sistem dengan pengurangan oksigen terkontrol hingga mencapai batas COL.

Integrasi data genomik memungkinkan identifikasi marker genetik yang terkait dengan toleransi lingkungan ekstrem. *Genome-Wide Association Study* (GWAS) dan QTL *mapping* digunakan untuk menemukan wilayah genom yang berkontribusi terhadap sifat-sifat adaptif tersebut. Informasi ini kemudian digunakan dalam genomic selection untuk mempercepat proses pemuliaan dengan meningkatkan akurasi prediksi nilai genetik individu. Studi pada ikan nila menunjukkan bahwa populasi dari lingkungan alami dengan kondisi hipoksia episodik memiliki adaptasi genetik yang lebih kuat dibandingkan populasi dari perairan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa sejarah lingkungan memainkan peran penting dalam membentuk variasi genetik yang dapat dimanfaatkan dalam program pemuliaan modern (Palaiokostas *et al*., 2016).

Selain seleksi genetik, konservasi keragaman genetik juga menjadi strategi penting untuk menjaga kapasitas adaptif jangka panjang. Populasi dengan keragaman genetik tinggi memiliki peluang lebih besar untuk beradaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berubah secara cepat dan tidak terprediksi akibat perubahan iklim global. Dengan demikian, pemuliaan untuk toleransi lingkungan ekstrem tidak hanya berfokus pada peningkatan performa saat ini, tetapi juga pada pembangunan sistem akuakultur yang resilien dan adaptif terhadap perubahan lingkungan di masa depan.

## E. Integrasi Bioteknologi dan *Biosecurity*

*Biosecurity* dalam akuakultur mencakup serangkaian praktik dan prosedur yang bertujuan mencegah introduksi, penyebaran, dan dampak agen penyakit dalam sistem produksi. Integrasi bioteknologi ke dalam sistem *biosecurity* memberikan nilai tambah yang signifikan, terutama dalam aspek diagnostik cepat, monitoring kesehatan berbasis biomarker, dan pengembangan strain yang memiliki ketahanan penyakit intrinsik lebih tinggi (Shinn *et al*., 2015).

Diagnostik molekuler cepat berbasis PCR, *loop-mediated isothermal amplification* (LAMP), dan biosensor berbasis CRISPR (seperti SHERLOCK dan DETECTR) memungkinkan deteksi patogen jauh lebih awal dan akurat dibandingkan metode konvensional, memungkinkan tindakan *biosecurity* yang lebih tepat waktu dan efektif. Pengembangan sistem monitoring kesehatan ikan berbasis biomarker

genomik (ekspresi gen imun, konsentrasi protein kekebalan) yang dapat diintegrasikan ke dalam sistem sensor akuakultur pintar merupakan arah perkembangan yang sangat menjanjikan (Dong *et al*., 2019).

## 1. Teknologi Bioteknologi untuk Diagnostik dan Monitoring *Biosecurity*

Integrasi bioteknologi dalam sistem *biosecurity* akuakultur telah mengubah pendekatan pengendalian penyakit dari reaktif menjadi proaktif. Jika sebelumnya deteksi penyakit dilakukan setelah muncul gejala klinis, maka teknologi molekuler modern memungkinkan identifikasi patogen pada tahap awal infeksi bahkan sebelum gejala terlihat, sehingga risiko penyebaran dapat ditekan secara signifikan (Shinn *et al*., 2015). Salah satu teknologi utama dalam diagnostik *biosecurity* adalah *Polymerase Chain Reaction* (PCR) dan turunannya seperti real-time PCR (qPCR), yang memungkinkan deteksi DNA atau RNA patogen dengan sensitivitas tinggi. Teknik ini banyak digunakan untuk mendeteksi virus, bakteri, dan parasit pada ikan budidaya secara cepat dan akurat.

Selain metode *Polymerase Chain Reaction*, teknik *Loop-Mediated Isothermal Amplification* menjadi alternatif penting karena dapat digunakan langsung di lapangan tanpa membutuhkan peralatan laboratorium yang kompleks. Teknik ini bekerja pada suhu konstan, sehingga proses amplifikasi asam nukleat dapat dilakukan dengan lebih sederhana, cepat, dan efisien. Hal ini membuatnya sangat sesuai untuk sistem akuakultur berskala kecil hingga menengah yang memerlukan deteksi dini penyakit di lokasi budidaya atau *point-of-care diagnostics*. Dengan karakteristik tersebut, *Loop-Mediated Isothermal Amplification* menjadi solusi praktis untuk mempercepat identifikasi patogen tanpa bergantung pada fasilitas laboratorium pusat.

Perkembangan terbaru dalam bidang diagnostik molekuler adalah biosensor berbasis *CRISPR* seperti *SHERLOCK* dan *DETECTR*. Sistem ini memanfaatkan kemampuan kompleks *CRISPR* dalam mengenali urutan genetik spesifik dari patogen dengan tingkat sensitivitas dan spesifisitas yang sangat tinggi. Setelah target genetik dikenali, sistem ini menghasilkan sinyal deteksi yang dapat dibaca secara cepat, sehingga memungkinkan identifikasi patogen dalam waktu singkat. Keunggulan ini menjadikan teknologi berbasis *CRISPR* sebagai

salah satu inovasi paling menjanjikan dalam diagnostik penyakit ikan modern.

Integrasi teknologi diagnostik molekuler seperti *Loop-Mediated Isothermal Amplification* dan biosensor berbasis *CRISPR* ke dalam sistem biosekuriti memungkinkan pemantauan kesehatan ikan secara lebih cepat dan akurat. Sistem ini mendukung pendekatan deteksi dini terhadap potensi wabah penyakit sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan sebelum infeksi menyebar secara luas di dalam sistem budidaya. Dengan demikian, kombinasi teknologi ini memperkuat kemampuan manajemen kesehatan ikan secara real-time dan meningkatkan efisiensi strategi pencegahan dalam akuakultur modern.

## 2. Integrasi Biomarker Genomik dan Sistem *Biosecurity* Cerdas

Selain diagnostik patogen, bioteknologi juga memungkinkan pengembangan sistem *biosecurity* berbasis biomarker genomik yang merefleksikan status fisiologis dan imunologis ikan secara langsung. Biomarker ini mencakup ekspresi gen imun, kadar protein pertahanan, serta indikator stres oksidatif yang dapat digunakan untuk memantau kesehatan populasi ikan secara dinamis. Ekspresi gen seperti *heat shock proteins* (HSPs), *interferon* (IFN), dan gen terkait respon inflamasi dapat digunakan sebagai indikator awal stres atau infeksi subklinis. Perubahan ekspresi gen ini sering terjadi sebelum munculnya gejala klinis, sehingga dapat berfungsi sebagai sistem deteksi dini yang sangat sensitif.

Pengembangan teknologi sensor berbasis *biosystem* dan integrasi dengan *Internet of Things* (IoT) membuka peluang lahirnya sistem akuakultur pintar (*smart aquaculture*). Dalam sistem ini, data lingkungan seperti suhu, pH, oksigen terlarut, serta biomarker biologis ikan dapat dipantau secara real-time dan dianalisis menggunakan algoritma berbasis kecerdasan buatan untuk mendeteksi potensi risiko penyakit atau stres lingkungan.

Integrasi antara biomarker genomik dan sistem monitoring digital ini memungkinkan pendekatan *biosecurity* yang lebih presisi, adaptif, dan efisien. Sistem ini tidak hanya meningkatkan respons terhadap ancaman penyakit, tetapi juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam manajemen budidaya ikan modern. Dengan demikian, integrasi bioteknologi dan *biosecurity* merupakan fondasi penting dalam membangun sistem akuakultur yang aman, produktif, dan berkelanjutan di era digital dan genomik.



# BAB IX
# NUTRIGENOMIK DAN EFISIENSI PAKAN DALAM AKUAKULTUR

## A. Konsep Nutrigenomik pada Ikan

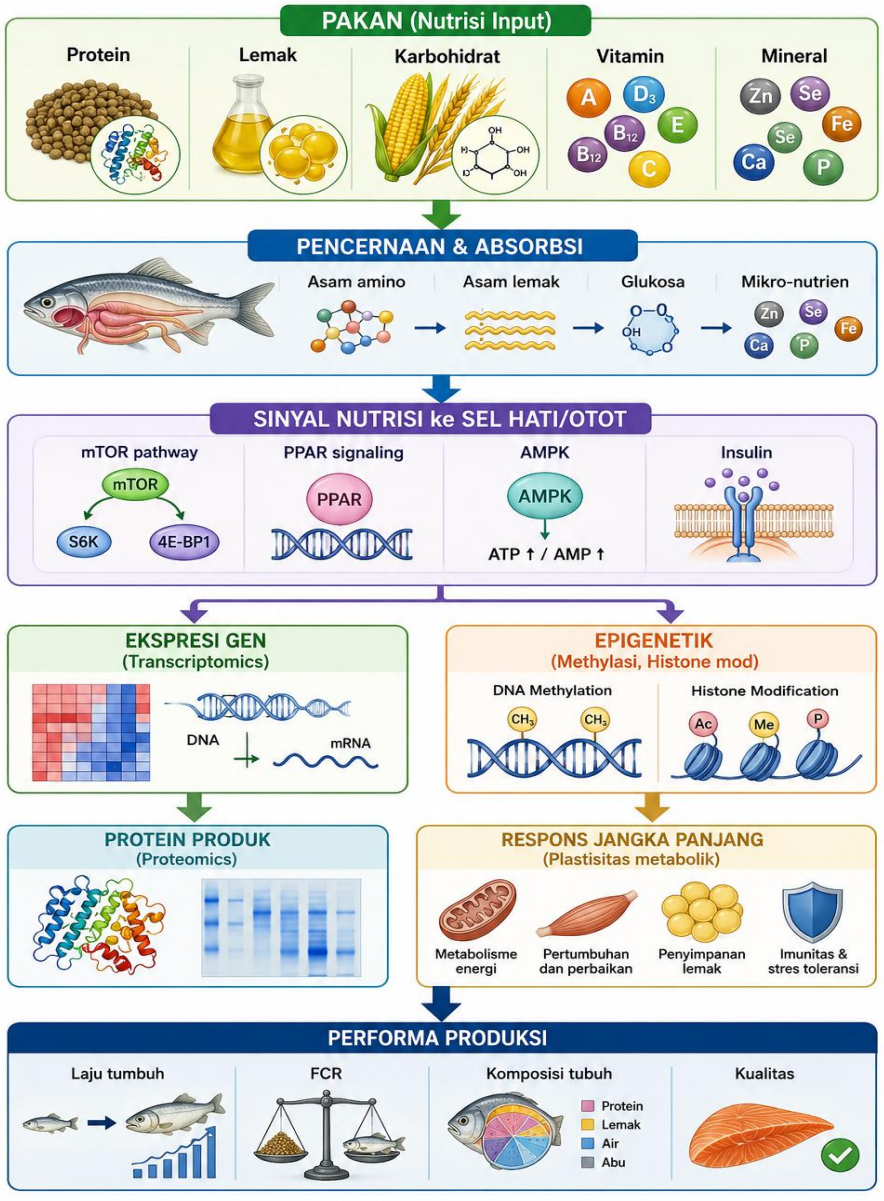
Nutrigenomik adalah cabang ilmu yang mempelajari interaksi antara nutrisi dengan ekspresi gen dan fungsi genomik secara menyeluruh. Dalam konteks akuakultur, nutrigenomik berfokus pada pemahaman tentang bagaimana komponen-komponen nutrisi pakan asam amino, asam lemak, karbohidrat, vitamin, dan mineral mempengaruhi ekspresi gen, proteom, metabolom, dan pada akhirnya performa fisiologis dan produktivitas ikan (Morais *et al*., 2012).

Relevansi nutrigenomik dalam akuakultur sangat tinggi mengingat biaya pakan berkontribusi 40-70% dari total biaya produksi. Optimasi formulasi pakan yang mempertimbangkan respons genomik individu atau galur tertentu berpotensi meningkatkan efisiensi konversi pakan, pertumbuhan, dan kualitas produk secara substansial. Pendekatan nutrigenomik memungkinkan formulasi pakan yang lebih presisi disesuaikan dengan kebutuhan spesifik genotip yang dibudidayakan sehingga mengurangi pemborosan nutrisi dan dampak lingkungan dari limbah nutrien (Tocher *et al*., 2019).

Teknologi *omics* yang digunakan dalam nutrigenomik ikan mencakup: *transcriptomics* (RNA-seq) untuk mengukur perubahan ekspresi gen sebagai respons terhadap diet yang berbeda, *proteomics* untuk mengidentifikasi protein yang mengalami perubahan regulasi, *metabolomics* untuk mengukur profil metabolit dalam jaringan dan

plasma, dan *lipidomics* untuk analisis komposisi asam lemak dan lipid secara komprehensif. Integrasi data dari berbagai platform *omics* ini, yang dikenal sebagai *multi-omics*, memberikan gambaran yang paling lengkap tentang respons biologis terhadap perlakuan nutrisi (Morais et al., 2012).

Gambar 7. Diagram Jalur Interaksi Antara Nutrisi Pakan dengan Ekspresi Gen dan Performa Produksi Ikan



Gambar tersebut menunjukkan bahwa nutrigenomik bekerja pada tingkat sistem biologis yang sangat kompleks, di mana pakan tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi, tetapi juga sebagai regulator ekspresi gen yang menentukan efisiensi pertumbuhan dan kualitas produksi ikan. Pendekatan ini membuka peluang untuk pengembangan pakan presisi (*precision nutrition*) yang disesuaikan dengan kebutuhan genetik spesifik setiap strain atau spesies ikan dalam sistem akuakultur modern.

## 1. Dasar Nutrigenomik dan Interaksi Nutrisi–Gen pada Ikan

Nutrigenomik merupakan cabang ilmu yang mempelajari bagaimana nutrisi memengaruhi ekspresi gen, aktivitas seluler, serta fungsi fisiologis organisme. Pada ikan budidaya, konsep ini menjadi sangat penting karena performa pertumbuhan, efisiensi pakan, ketahanan penyakit, dan kualitas produk akhir sangat dipengaruhi oleh interaksi antara faktor genetik dan komposisi nutrisi pakan (Morais *et al*., 2012). Berbeda dengan pendekatan nutrisi konvensional yang hanya berfokus pada pemenuhan kebutuhan nutrien dasar, nutrigenomik menempatkan nutrisi sebagai regulator molekuler yang mampu mengubah aktivitas gen dan jalur metabolisme secara langsung. Interaksi antara nutrisi dan genom dimulai ketika komponen pakan seperti protein, lipid, karbohidrat, vitamin, dan mineral mengalami proses pencernaan dan absorpsi. Nutrien hasil pencernaan kemudian berfungsi tidak hanya sebagai sumber energi dan bahan pembangun jaringan, tetapi juga sebagai molekul sinyal yang mengaktifkan berbagai jalur regulasi genetik. Jalur mTOR, misalnya, berperan penting dalam mengatur sintesis protein dan pertumbuhan otot sebagai respons terhadap ketersediaan asam amino. Jalur PPAR mengatur metabolisme lipid dan oksidasi asam lemak, sedangkan AMPK berfungsi sebagai sensor energi seluler yang mengatur keseimbangan metabolisme ketika terjadi defisit energi.

Perubahan sinyal nutrisi ini kemudian memengaruhi tingkat ekspresi gen melalui mekanisme *transcriptomics* dan regulasi epigenetik. Nutrisi tertentu dapat meningkatkan atau menekan transkripsi gen tertentu sehingga menghasilkan perubahan produksi protein metabolik, hormon, dan enzim pencernaan. Selain itu, nutrisi juga dapat memengaruhi mekanisme epigenetik seperti metilasi DNA dan modifikasi histon yang berperan dalam pengaturan ekspresi gen jangka panjang. Efek epigenetik ini sangat penting karena dapat

memengaruhi performa ikan bahkan setelah perubahan komposisi pakan dihentikan. Dalam akuakultur modern, pemahaman mengenai interaksi nutrisi–gen memberikan peluang untuk mengembangkan *precision nutrition*, yaitu formulasi pakan yang disesuaikan dengan karakteristik genetik spesifik strain ikan tertentu. Pendekatan ini memungkinkan efisiensi penggunaan nutrien yang lebih tinggi, penurunan limbah metabolik, serta peningkatan performa produksi secara berkelanjutan. Dengan demikian, nutrigenomik menjadi fondasi penting dalam pengembangan sistem budidaya ikan berbasis bioteknologi dan genomik modern.

## 2. Teknologi *Omics* dalam Nutrigenomik Akuakultur

Perkembangan teknologi *omics* telah mempercepat kemajuan penelitian nutrigenomik pada ikan budidaya. Teknologi ini memungkinkan analisis biologis dilakukan secara menyeluruh pada berbagai tingkat organisasi molekuler, mulai dari gen, RNA, protein, hingga metabolit. Pendekatan *omics* memberikan pemahaman yang jauh lebih komprehensif dibandingkan analisis nutrisi konvensional karena mampu mengungkap mekanisme biologis yang mendasari respons ikan terhadap formulasi pakan tertentu. *Transcriptomics* menggunakan teknologi RNA sequencing (RNA-seq) untuk mengukur perubahan ekspresi ribuan gen secara simultan sebagai respons terhadap perlakuan nutrisi tertentu. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat mengidentifikasi gen-gen yang berhubungan dengan pertumbuhan, metabolisme energi, respons imun, dan stres nutrisi. Sebagai contoh, diet tinggi protein dapat meningkatkan ekspresi gen yang terkait dengan sintesis otot dan metabolisme asam amino, sedangkan diet kaya lipid dapat mengaktifkan gen-gen metabolisme lemak melalui jalur PPAR.

Selain *transcriptomics*, *proteomics* digunakan untuk menganalisis perubahan komposisi dan kuantitas protein yang dihasilkan oleh sel sebagai respons terhadap diet tertentu. Karena protein merupakan pelaksana utama fungsi biologis, analisis proteomik memberikan informasi langsung mengenai perubahan fisiologis yang terjadi pada tubuh ikan. Dalam penelitian akuakultur, *proteomics* banyak digunakan untuk mengevaluasi kualitas daging ikan, efisiensi metabolisme nutrien, serta respons stres akibat perubahan formulasi pakan. *Metabolomics* dan *lipidomics* melengkapi pendekatan nutrigenomik dengan menganalisis metabolit dan profil lipid yang

dihasilkan dalam jaringan tubuh ikan. *Metabolomics* memungkinkan identifikasi perubahan jalur metabolisme akibat perlakuan nutrisi, sedangkan *lipidomics* memberikan informasi rinci mengenai komposisi asam lemak dan distribusi lipid pada jaringan ikan. Pendekatan ini sangat penting dalam pengembangan pakan yang bertujuan meningkatkan kandungan omega-3, kualitas fillet, serta efisiensi penggunaan energi.

Integrasi seluruh data *transcriptomics*, *proteomics*, *metabolomics*, dan *lipidomics* dikenal sebagai pendekatan *multi-omics*. Pendekatan ini memungkinkan pemahaman sistem biologis secara holistik karena setiap tingkat molekuler saling terhubung dalam membentuk respons fisiologis ikan terhadap nutrisi. Dalam akuakultur modern, *multi-omics* menjadi dasar pengembangan *precision feeding system* dan *smart aquaculture nutrition* yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menekan dampak lingkungan dari aktivitas budidaya ikan.

## B. Interaksi Gen dan Nutrisi

Interaksi gen-nutrisi dapat berjalan dalam dua arah. Pertama, nutrisi mempengaruhi ekspresi gen (*nutrigenomics*). Asam lemak tak jenuh ganda (PUFA), misalnya, bertindak sebagai ligan untuk nuclear receptors seperti *Peroxisome Proliferator-Activated Receptors* (PPARs) dan *Liver X Receptors* (LXRs) yang meregulasi ekspresi ratusan gen yang terlibat dalam metabolisme lipid, inflamasi, dan fungsi imun. Asam lemak omega-3 (EPA dan DHA) diketahui menurunkan ekspresi gen-gen pro-inflamasi dan meningkatkan ekspresi gen-gen anti-inflamasi melalui jalur ini (Tocher, 2015).

Kedua, genotip individu mempengaruhi respons terhadap nutrisi tertentu (*nutrigenetics*). Polimorfisme genetik dalam gen-gen enzim metabolisme, transporter nutrisi, atau reseptor dapat menyebabkan variasi antar individu dalam efisiensi penyerapan, metabolisme, dan utilisasi nutrisi. Contoh yang relevan untuk akuakultur adalah variasi genetik dalam gen FADS (*Fatty Acid Desaturase*) yang menentukan kemampuan ikan untuk mengonversi asam lemak rantai pendek (ALA, C18:3n-3) menjadi asam lemak rantai panjang omega-3 (EPA, DHA) yang bernilai gizi tinggi (Morais et al., 2012).

Implikasi praktis dari pemahaman interaksi gen-nutrisi dalam pemuliaan ikan sangat signifikan. Program pemuliaan dapat dirancang

untuk mengidentifikasi dan menyeleksi genotip yang memiliki kemampuan konversi dan utilisasi nutrisi lebih efisien, bahkan ketika pakan berbasis bahan alternatif (misalnya minyak nabati sebagai pengganti minyak ikan) digunakan. Strain ikan yang efisien dalam mensintesis DHA dari prekursor nabati memiliki nilai komersial yang sangat tinggi dalam konteks keberlanjutan industri pakan ikan (Tocher et al., 2019).

## 1. Pengaruh Nutrisi terhadap Ekspresi Gen pada Ikan

Interaksi antara nutrisi dan genom merupakan dasar utama dalam konsep nutrigenomik. Pada mekanisme ini, nutrisi tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi dan bahan penyusun jaringan, tetapi juga bertindak sebagai regulator molekuler yang mampu memengaruhi aktivitas gen di dalam sel. Berbagai komponen nutrisi seperti asam lemak, asam amino, vitamin, dan mineral dapat mengaktifkan atau menekan ekspresi gen tertentu melalui jalur regulasi transkripsi dan sinyal seluler (Tocher, 2015). Salah satu contoh paling penting adalah peran asam lemak tak jenuh ganda atau *Polyunsaturated Fatty Acids* (PUFA), khususnya omega-3 seperti EPA (*Eicosapentaenoic Acid*) dan DHA (*Docosahexaenoic Acid*). Asam lemak ini bekerja sebagai ligan bagi nuclear receptors seperti *Peroxisome Proliferator-Activated Receptors* (PPARs) dan *Liver X Receptors* (LXRs). Aktivasi reseptor tersebut kemudian mengatur ekspresi ratusan gen yang terlibat dalam metabolisme lipid, homeostasis energi, inflamasi, dan sistem imun. Aktivitas jalur ini menyebabkan peningkatan efisiensi metabolisme lemak serta penurunan respons inflamasi pada ikan.

Selain itu, nutrisi tertentu juga dapat memengaruhi jalur sinyal seluler seperti mTOR, AMPK, dan *insulin signaling pathway*. Jalur mTOR sangat penting dalam regulasi pertumbuhan dan sintesis protein otot sebagai respons terhadap ketersediaan asam amino. Ketika kandungan protein dalam pakan mencukupi, jalur mTOR akan teraktivasi sehingga meningkatkan translasi protein dan pertumbuhan jaringan. Sebaliknya, kondisi kekurangan energi akan mengaktifkan AMPK yang berfungsi menghemat penggunaan energi seluler dan meningkatkan oksidasi lemak. Pengaruh nutrisi terhadap ekspresi gen juga dapat berlangsung melalui mekanisme epigenetik. Komponen nutrisi tertentu mampu mengubah pola metilasi DNA dan modifikasi histon yang memengaruhi aksesibilitas gen untuk ditranskripsi. Efek ini

dapat berlangsung dalam jangka panjang dan memengaruhi performa fisiologis ikan secara berkelanjutan. Oleh karena itu, formulasi pakan modern tidak lagi hanya mempertimbangkan kandungan nutrisi total, tetapi juga dampaknya terhadap regulasi genetik dan metabolisme ikan secara keseluruhan.

## 2. Pengaruh Genotip terhadap Respons Nutrisi pada Ikan

Selain nutrisi memengaruhi ekspresi gen, genotip individu juga menentukan bagaimana ikan merespons suatu jenis nutrisi. Konsep ini dikenal sebagai *nutrigenetics*, yaitu studi mengenai variasi respons biologis terhadap nutrisi yang disebabkan oleh perbedaan genetik antar individu atau populasi. Variasi ini menyebabkan setiap strain ikan memiliki kemampuan berbeda dalam mencerna, menyerap, memetabolisme, dan memanfaatkan nutrien dari pakan (Morais *et al*., 2012). Polimorfisme genetik pada gen-gen yang terlibat dalam metabolisme nutrien menjadi faktor utama yang memengaruhi efisiensi penggunaan pakan. Salah satu contoh penting dalam akuakultur adalah gen *Fatty Acid Desaturase* (FADS), yang berperan dalam biosintesis asam lemak omega-3 rantai panjang seperti EPA dan DHA dari prekursor nabati berupa *Alpha-Linolenic Acid* (ALA). Variasi genetik pada gen FADS menyebabkan sebagian ikan memiliki kemampuan konversi asam lemak yang lebih tinggi dibandingkan individu lainnya. Hal ini sangat penting karena sumber minyak ikan sebagai bahan baku pakan semakin terbatas dan mahal. Perbedaan genetik juga ditemukan pada gen transporter nutrisi, enzim pencernaan, dan receptor metabolik. Variasi pada gen-gen tersebut dapat memengaruhi efisiensi absorpsi glukosa, metabolisme protein, hingga penggunaan lipid sebagai sumber energi. Akibatnya, dua strain ikan yang diberi pakan dengan formulasi sama dapat menunjukkan performa pertumbuhan, *Feed Conversion Ratio* (FCR), dan kualitas tubuh yang berbeda secara signifikan.

Dalam konteks pemuliaan ikan modern, pemahaman mengenai nutrigenetics membuka peluang pengembangan strain yang lebih efisien dalam memanfaatkan pakan alternatif berbasis nabati. Strain ikan yang mampu mensintesis DHA secara efisien dari sumber nabati memiliki nilai ekonomi dan ekologis yang sangat tinggi karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap minyak ikan laut. Pendekatan ini mendukung pengembangan akuakultur berkelanjutan melalui integrasi antara seleksi genetik dan precision nutrition. Integrasi nutrigenomik dan nutrigenetics

pada akhirnya memungkinkan pengembangan sistem "*personalized feeding*" dalam akuakultur, yaitu formulasi pakan yang disesuaikan dengan karakteristik genetik spesifik strain atau populasi ikan tertentu. Pendekatan ini diperkirakan akan menjadi salah satu fondasi utama akuakultur presisi (*precision aquaculture*) di masa depan karena mampu meningkatkan efisiensi produksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari limbah nutrien budidaya.

## C. Efisiensi Konversi Pakan

*Feed Conversion Ratio* (FCR) atau rasio konversi pakan adalah ukuran efisiensi metabolik yang menggambarkan jumlah pakan (dalam kg atau g) yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit peningkatan bobot badan ikan. FCR yang lebih rendah mencerminkan efisiensi yang lebih tinggi dan merupakan target utama seleksi dalam program pemuliaan ikan komersial, mengingat pakan merupakan komponen biaya terbesar dalam produksi akuakultur (Nguyen, 2016).

Pengukuran FCR individual pada ikan merupakan tantangan teknis yang signifikan, karena membutuhkan pemeliharaan ikan secara individual atau dalam kelompok kecil yang dapat dikontrol asupan pakannya. Berbagai pendekatan teknologi telah dikembangkan untuk mengatasi tantangan ini, termasuk sistem *auto-feeder* dengan sensor konsumsi pakan, analisis komposisi tubuh menggunakan *Dual Energy X-ray Absorptiometry* (DEXA) atau *Near Infrared Spectroscopy* (NIRS), dan penggunaan isotop stabil sebagai pelacak metabolisme (Pérez-Ramírez *et al*., 2020).

Heritabilitas FCR pada ikan umumnya berkisar antara 0,15 hingga 0,35 (sedang), menunjukkan bahwa seleksi untuk efisiensi pakan dapat memberikan kemajuan genetik yang bermakna. Studi genetik kuantitatif menunjukkan adanya korelasi genetik negatif yang moderat antara FCR dan laju pertumbuhan pada beberapa spesies, artinya ikan yang tumbuh lebih cepat cenderung juga memiliki FCR yang lebih baik. Namun, korelasi ini tidak selalu konsisten dan bergantung pada kondisi nutrisi dan lingkungan tempat pengukuran dilakukan (Nguyen, 2016).

Tabel 11. FCR Rata-Rata Industri, Target Program Pemuliaan, dan Metode Pengukuran FCR pada Berbagai Spesies Akuakultur

| Spesies | FCR Rata-rata Industri | Target FCR Program Pemuliaan | Metode Pengukuran FCR |
|---|---|---|---|
| Salmon Atlantik (S. salar) | 1,0 – 1,2 | 0,9 – 1,0 | Auto-feeder + DEXA |
| Nila (O. niloticus) | 1,5 – 2,0 | 1,2 – 1,5 | Kelompok kecil terisolasi |
| Lele Afrika (C. gariepinus) | 1,2 – 1,8 | 1,0 – 1,3 | Kelompok terisolasi |
| Ikan mas (C. carpio) | 2,0 – 3,0 | 1,5 – 2,0 | Kolam percobaan |
| Udang vannamei (L. vannamei) | 1,3 – 1,8 | 1,1 – 1,4 | Sistem biofloc terkontrol |
| Kerapu cantang (E. fuscoguttatus × E. lanceolatus) | 2,0 – 3,5 | 1,5 – 2,5 | Sistem KJA terpisah |

Tabel 11 menyajikan perbandingan nilai *Feed Conversion Ratio* (FCR) pada berbagai spesies akuakultur, meliputi kondisi rata-rata industri, target dalam program pemuliaan, serta metode pengukuran yang digunakan untuk memperoleh data tersebut. Informasi ini penting karena FCR merupakan indikator langsung efisiensi pemanfaatan pakan, yang memiliki dampak ekonomi paling besar dalam sistem produksi akuakultur.

Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa terdapat variasi yang signifikan dalam efisiensi konversi pakan antar spesies akuakultur, yang dipengaruhi oleh fisiologi, jenis pakan, serta sistem budidaya yang digunakan. Perbedaan antara FCR industri dan target pemuliaan juga menunjukkan adanya ruang peningkatan genetik yang dapat dicapai melalui seleksi berbasis genomik dan optimasi manajemen pakan. Efisiensi FCR yang lebih rendah tidak hanya mengurangi biaya produksi,

tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan melalui pengurangan limbah nutrien dalam sistem akuakultur.

## 1. Konsep dan Pengukuran Efisiensi Konversi Pakan pada Ikan

*Feed Conversion Ratio* (FCR) merupakan salah satu parameter paling penting dalam industri akuakultur karena menggambarkan tingkat efisiensi penggunaan pakan oleh ikan. FCR didefinisikan sebagai jumlah pakan yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan peningkatan biomassa tubuh ikan. Semakin rendah nilai FCR, semakin efisien ikan dalam mengubah pakan menjadi pertumbuhan, sehingga biaya produksi menjadi lebih rendah dan limbah nutrien yang dihasilkan juga semakin sedikit (Nguyen, 2016). Dalam sistem budidaya modern, efisiensi konversi pakan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi, termasuk kualitas genetik ikan, formulasi pakan, kondisi lingkungan, kesehatan ikan, dan sistem manajemen budidaya. Ikan dengan kemampuan metabolisme yang baik cenderung mampu mengalokasikan energi pakan secara lebih efisien untuk pertumbuhan dibandingkan untuk aktivitas pemeliharaan tubuh atau respons stres. Oleh karena itu, FCR tidak hanya mencerminkan kualitas pakan, tetapi juga kapasitas fisiologis dan genetik ikan dalam memanfaatkan nutrien.

Pengukuran FCR individual pada ikan merupakan tantangan besar dalam penelitian pemuliaan karena ikan umumnya dipelihara secara berkelompok dalam lingkungan akuatik. Untuk mengatasi hal ini, berbagai teknologi telah dikembangkan guna meningkatkan akurasi pengukuran konsumsi pakan dan pertumbuhan biomassa. Sistem *auto-feeder* berbasis sensor memungkinkan pencatatan konsumsi pakan secara otomatis dan real-time. Selain itu, teknologi *Dual Energy X-ray Absorptiometry* (DEXA) digunakan untuk mengukur komposisi tubuh dan perubahan biomassa secara presisi, sedangkan *Near Infrared Spectroscopy* (NIRS) digunakan untuk analisis komposisi jaringan secara cepat dan non-destruktif. Pendekatan lain yang mulai berkembang adalah penggunaan isotop stabil sebagai tracer metabolisme untuk mengevaluasi efisiensi pemanfaatan nutrien dalam tubuh ikan. Teknik ini memungkinkan peneliti melacak alokasi nutrien ke berbagai jaringan tubuh dan menentukan seberapa efisien energi dari pakan dikonversi menjadi biomassa. Integrasi teknologi sensor, imaging, dan bioinformatika dalam pengukuran FCR menunjukkan bahwa akuakultur

modern semakin mengarah pada sistem precision aquaculture berbasis data.

Variasi FCR antar spesies ikan juga menunjukkan perbedaan fisiologis dan strategi 187etabolism masing-masing organisme. Salmon Atlantik memiliki nilai FCR yang sangat rendah karena efisiensi 187etabolism protein dan lipid yang tinggi, sedangkan ikan mas dan kerapu cenderung memiliki FCR lebih tinggi akibat karakteristik fisiologi dan kebutuhan nutrisi yang berbeda. Oleh karena itu, target pemuliaan FCR harus disesuaikan dengan karakter biologis masing-masing spesies budidaya.

## 2. Dasar Genetik dan Pemuliaan untuk Efisiensi Pakan

Efisiensi konversi pakan memiliki komponen genetik yang cukup kuat sehingga dapat ditingkatkan melalui program pemuliaan selektif. Nilai heritabilitas FCR pada berbagai spesies ikan umumnya berada pada kisaran sedang, yaitu sekitar 0,15–0,35, yang menunjukkan bahwa sebagian variasi efisiensi pakan dikendalikan oleh faktor genetik dan dapat diwariskan antar generasi (Nguyen, 2016). Kondisi ini memberikan peluang besar bagi program pemuliaan untuk menghasilkan strain ikan dengan efisiensi metabolik yang lebih tinggi. Studi genetika kuantitatif menunjukkan bahwa FCR berkaitan dengan berbagai jalur fisiologis dan metabolik, termasuk metabolisme energi, sintesis protein, aktivitas enzim pencernaan, regulasi hormon pertumbuhan, serta efisiensi penggunaan lipid dan karbohidrat. Gen-gen yang terlibat dalam jalur mTOR, insulin signaling, dan metabolisme asam amino diketahui memiliki pengaruh penting terhadap efisiensi pertumbuhan dan penggunaan nutrien. Variasi genetik pada jalur-jalur ini menyebabkan adanya perbedaan kemampuan konversi pakan antar individu maupun antar strain ikan.

Dalam beberapa spesies, ditemukan korelasi genetik negatif antara FCR dan laju pertumbuhan, yang berarti ikan yang tumbuh lebih cepat cenderung memiliki efisiensi pakan yang lebih baik. Namun hubungan ini tidak selalu konsisten karena sangat dipengaruhi oleh lingkungan, kualitas pakan, dan sistem budidaya. Pada kondisi tertentu, peningkatan pertumbuhan dapat disertai peningkatan konsumsi pakan yang justru memperburuk FCR. Oleh sebab itu, program seleksi modern umumnya menggunakan pendekatan multi-trait selection yang mempertimbangkan pertumbuhan, FCR, kesehatan, dan kualitas produk

secara bersamaan. Perkembangan teknologi genomik telah mempercepat seleksi untuk efisiensi pakan melalui pendekatan *Marker Assisted Selection* (MAS) dan *Genomic Selection* (GS). Identifikasi QTL dan SNP yang berhubungan dengan efisiensi metabolisme memungkinkan prediksi performa FCR dilakukan sejak tahap juvenil tanpa harus menunggu pengukuran fenotipik jangka panjang. Pendekatan *genomic prediction* juga memungkinkan peningkatan akurasi seleksi terutama pada karakter yang sulit diukur seperti konsumsi pakan individual.

Pemuliaan untuk efisiensi pakan memiliki implikasi ekonomi dan lingkungan yang sangat besar. Penurunan nilai FCR berarti pengurangan kebutuhan pakan, yang secara langsung menurunkan biaya produksi. Selain itu, efisiensi nutrisi yang lebih baik juga mengurangi limbah nitrogen dan fosfor ke lingkungan perairan, sehingga mendukung pengembangan akuakultur berkelanjutan. Dengan demikian, seleksi genetik untuk FCR tidak hanya meningkatkan profitabilitas industri, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan ekosistem akuatik secara jangka panjang.

## D. Bioteknologi Pakan Fungsional

Pakan fungsional (*functional feed*) adalah pakan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan nutrisi dasar ikan, tetapi juga mengandung bahan bioaktif yang memberikan manfaat kesehatan spesifik seperti imunomodulasi, peningkatan ketahanan terhadap penyakit, optimasi komposisi mikrobiota intestinal, atau peningkatan kualitas produk. Pengembangan pakan fungsional untuk akuakultur merupakan salah satu area penelitian yang paling aktif dan menjanjikan (Gatlin *et al*., 2006).

Probiotik dan prebiotik merupakan komponen fungsional yang paling banyak diteliti untuk pakan ikan. Probiotik adalah mikroorganisme hidup yang, ketika diberikan dalam jumlah yang cukup, memberikan manfaat kesehatan pada inang. Galur-galur *Lactobacillus, Bacillus,* dan *Saccharomyces cerevisiae* telah terbukti dapat meningkatkan pertumbuhan, efisiensi pakan, dan ketahanan terhadap penyakit pada berbagai spesies ikan melalui mekanisme kompetisi dengan patogen, produksi senyawa antimikroba, dan modulasi respons imun (Ringø *et al*., 2010).

Perkembangan bioteknologi pakan terkini mencakup penggunaan rekombinase vaksin yang diekspresikan dalam bahan pakan

(*oral vaccine delivery*), mikroalga termodifikasi genetik untuk produksi asam lemak omega-3 dan pigmen karotenoid yang lebih efisien, serta *single cell protein* (SCP) dari mikroorganisme sebagai alternatif berkelanjutan untuk tepung ikan. Teknologi fermentasi presisi menggunakan mikroorganisme yang direkayasa secara metabolik untuk memproduksi protein, asam amino esensial, dan lipid fungsional secara lebih efisien dari substrat yang murah dan berlimpah merupakan frontier selanjutnya dalam inovasi pakan akuakultur (Tocher *et al*., 2019).

## 1. Konsep dan Komponen Pakan Fungsional dalam Akuakultur

Pakan fungsional merupakan jenis pakan yang dirancang tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan nutrisi dasar ikan, tetapi juga memberikan manfaat fisiologis tambahan yang mendukung kesehatan, performa pertumbuhan, dan ketahanan terhadap stres maupun penyakit. Dalam akuakultur modern, konsep pakan fungsional berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem budidaya yang lebih efisien, berkelanjutan, dan minim penggunaan antibiotik. Oleh karena itu, pakan kini dipandang sebagai alat biologis yang mampu memodulasi sistem imun, metabolisme, dan keseimbangan mikrobiota ikan (Gatlin *et al*., 2006). Salah satu komponen utama pakan fungsional adalah probiotik, yaitu mikroorganisme hidup yang memberikan manfaat kesehatan ketika dikonsumsi dalam jumlah yang cukup. Berbagai genus bakteri seperti *Lactobacillus, Bacillus*, dan *Saccharomyces cerevisiae* telah banyak diaplikasikan dalam akuakultur karena mampu meningkatkan keseimbangan mikrobiota usus, menghambat pertumbuhan patogen, serta memperbaiki efisiensi pencernaan dan absorpsi nutrien. Mekanisme kerja probiotik meliputi kompetisi ruang dan nutrisi dengan mikroorganisme patogen, produksi senyawa antimikroba, serta stimulasi sistem imun innate dan adaptif pada ikan (Ringø *et al*., 2010).

Selain probiotik, prebiotik juga menjadi komponen penting dalam pakan fungsional. Prebiotik merupakan senyawa *non-digestible* seperti oligosakarida dan serat tertentu yang berfungsi merangsang pertumbuhan bakteri menguntungkan dalam saluran pencernaan. Kombinasi probiotik dan prebiotik, yang dikenal sebagai sinbiotik, menunjukkan efek sinergis dalam meningkatkan kesehatan usus, efisiensi konversi pakan, dan ketahanan terhadap infeksi penyakit. Pakan fungsional modern juga sering diperkaya dengan *imunostimulan* seperti *β-glucan, nukleotida*, ekstrak tanaman herbal, vitamin C, vitamin E, serta

mineral esensial seperti selenium dan zinc. Senyawa-senyawa ini berperan dalam meningkatkan aktivitas fagositosis, produksi antibodi, dan respons antioksidan pada tubuh ikan. Dalam kondisi budidaya intensif yang rentan terhadap stres lingkungan dan penyakit, penggunaan pakan fungsional terbukti mampu meningkatkan tingkat kelangsungan hidup dan performa produksi secara signifikan. Perkembangan konsep *functional feed* menunjukkan perubahan paradigma dalam nutrisi akuakultur, dari sekadar memenuhi kebutuhan energi menuju pendekatan kesehatan holistik berbasis fisiologi dan bioteknologi. Dengan demikian, pakan fungsional menjadi salah satu strategi utama dalam mendukung akuakultur berkelanjutan dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan kimia maupun antibiotik.

## 2. Inovasi Bioteknologi dalam Pengembangan Pakan Fungsional

Kemajuan bioteknologi telah membuka peluang besar dalam pengembangan pakan fungsional generasi baru untuk akuakultur. Salah satu inovasi yang berkembang pesat adalah penggunaan vaksin oral berbasis rekombinan yang diekspresikan langsung dalam bahan pakan. Teknologi ini memungkinkan antigen patogen diproduksi oleh mikroorganisme atau tanaman tertentu dan kemudian diberikan melalui pakan, sehingga vaksinasi dapat dilakukan secara massal tanpa perlu injeksi individual. Pendekatan ini sangat potensial untuk meningkatkan efisiensi *biosecurity* pada budidaya ikan skala besar. Bioteknologi mikroalga juga menjadi fokus utama dalam pengembangan bahan baku pakan masa depan. Mikroalga yang dimodifikasi secara genetik dapat diprogram untuk menghasilkan asam lemak omega-3 seperti EPA dan DHA dalam jumlah tinggi, menggantikan ketergantungan terhadap minyak ikan laut yang semakin terbatas. Selain itu, mikroalga juga digunakan untuk produksi pigmen alami seperti astaxanthin dan karotenoid yang penting dalam meningkatkan warna dan kualitas fillet ikan budidaya.

Inovasi lainnya adalah pengembangan *Single Cell Protein* (SCP), yaitu sumber protein alternatif yang berasal dari mikroorganisme seperti bakteri, khamir, dan mikroalga. SCP memiliki kandungan protein tinggi, profil asam amino yang baik, serta dapat diproduksi menggunakan substrat murah dan limbah organik. Teknologi ini dinilai sangat menjanjikan sebagai pengganti tepung ikan karena lebih berkelanjutan dan tidak bergantung pada eksploitasi sumber daya laut. Teknologi

fermentasi presisi (*precision fermentation*) juga mulai diterapkan dalam industri pakan akuakultur. Melalui rekayasa metabolik, mikroorganisme dapat didesain untuk memproduksi protein spesifik, enzim pencernaan, asam amino esensial, maupun lipid fungsional dengan efisiensi tinggi. Pendekatan ini memungkinkan produksi bahan baku pakan bernilai tinggi secara lebih konsisten dan ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional.

Integrasi bioteknologi dengan nutrigenomik dan precision nutrition diperkirakan akan menjadi arah utama perkembangan pakan akuakultur di masa depan. Pakan tidak lagi diproduksi secara umum untuk semua strain ikan, tetapi dapat dirancang secara spesifik sesuai kebutuhan genetik dan fisiologis populasi tertentu. Dengan pendekatan ini, efisiensi produksi dapat meningkat secara signifikan sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari sistem budidaya intensif.

## E. Pemuliaan untuk Efisiensi Metabolik

Pemuliaan untuk efisiensi metabolik adalah pendekatan holistik yang bertujuan mengidentifikasi dan mengseleksi genotip ikan yang paling efisien dalam mengkonversi nutrisi pakan menjadi biomassa ikan yang bernilai ekonomi. Berbeda dari seleksi FCR yang bersifat fenomenologis, pendekatan metabolik berusaha memahami dan memanfaatkan perbedaan genetik dalam jalur-jalur metabolik spesifik yang mendasari efisiensi nutrisi (Pérez-Ramírez *et al*., 2020).

Identifikasi biomarker metabolik yang berkorelasi dengan performa produksi dapat memungkinkan seleksi awal yang lebih efisien, tanpa perlu menunggu pengukuran fenotipik yang memakan waktu lama seperti FCR atau bobot panen. Metabolomics plasma darah yang mengidentifikasi profil metabolit asam amino bebas, asam lemak, glukosa, laktat, dan keton bodies pada individu-individu dengan EBV tinggi dan rendah untuk efisiensi pakan dapat menghasilkan biomarker metabolik yang berguna untuk seleksi awal. Integrasi data metabolomik dengan data genomik dalam model prediksi multivariat merupakan frontier penelitian yang sedang intensif dikembangkan (Morais *et al*., 2012).

## 1. Konsep Efisiensi Metabolik dalam Pemuliaan Ikan

Efisiensi metabolik merupakan kemampuan biologis ikan dalam memanfaatkan nutrien pakan secara optimal untuk mendukung pertumbuhan, pemeliharaan jaringan tubuh, aktivitas fisiologis, dan respons imun dengan penggunaan energi seminimal mungkin. Dalam konteks akuakultur modern, efisiensi metabolik menjadi salah satu target utama pemuliaan karena berkaitan langsung dengan efisiensi pakan, biaya produksi, dan keberlanjutan lingkungan budidaya (Pérez-Ramírez *et al*., 2020). Berbeda dengan pendekatan konvensional yang hanya mengukur performa fenotipik seperti pertumbuhan dan *Feed Conversion Ratio* (FCR), pendekatan pemuliaan berbasis efisiensi metabolik berupaya memahami mekanisme biologis internal yang mengatur penggunaan energi dan nutrien pada tingkat molekuler. Dengan demikian, seleksi tidak hanya diarahkan pada ikan yang tumbuh cepat, tetapi juga pada individu yang mampu memanfaatkan nutrisi secara lebih efisien melalui regulasi metabolik yang optimal.

Proses metabolisme ikan melibatkan berbagai jalur biokimia yang kompleks, termasuk metabolisme protein, lipid, dan karbohidrat. Jalur-jalur ini dikendalikan oleh berbagai gen dan regulator molekuler seperti mTOR, AMPK, insulin signaling pathway, dan PPARs yang mengatur sintesis protein, oksidasi asam lemak, penyimpanan energi, serta homeostasis glukosa. Variasi genetik pada gen-gen regulator metabolik tersebut menyebabkan perbedaan efisiensi metabolisme antar individu ikan, sehingga beberapa ikan mampu menghasilkan pertumbuhan lebih tinggi dengan jumlah pakan yang sama. Dalam pemuliaan ikan, efisiensi metabolik memiliki hubungan erat dengan beberapa parameter produksi penting seperti laju pertumbuhan, retensi protein, efisiensi penggunaan nitrogen, ketahanan terhadap stres, dan kualitas fillet. Ikan dengan efisiensi metabolik tinggi cenderung menghasilkan limbah metabolik yang lebih rendah, sehingga memberikan keuntungan tambahan berupa pengurangan pencemaran nitrogen dan fosfor dalam sistem budidaya.

Pendekatan metabolik juga sangat penting dalam pengembangan sistem akuakultur berkelanjutan. Ketika industri mulai mengurangi ketergantungan terhadap tepung ikan dan minyak ikan melalui penggunaan bahan pakan alternatif berbasis nabati atau mikroorganisme, diperlukan strain ikan yang memiliki kemampuan metabolik adaptif terhadap perubahan komposisi nutrisi tersebut. Oleh karena itu,

pemuliaan berbasis efisiensi metabolik menjadi strategi penting untuk mendukung transisi menuju akuakultur yang lebih ramah lingkungan dan efisien secara ekonomi.

## 2. Integrasi Metabolomik dan Genomik dalam Seleksi Ikan

Perkembangan teknologi *omics* telah membuka peluang baru dalam identifikasi biomarker metabolik yang dapat digunakan sebagai indikator awal performa produksi ikan. Metabolomics memungkinkan analisis komprehensif terhadap metabolit kecil dalam tubuh ikan, seperti asam amino bebas, glukosa, asam lemak, laktat, kolesterol, dan keton bodies yang mencerminkan kondisi fisiologis serta status metabolisme individu secara real time (Morais *et al*., 2012). Dalam studi pemuliaan modern, profil metabolit plasma darah atau jaringan ikan dibandingkan antara individu dengan nilai *Estimated Breeding Value* (EBV) tinggi dan rendah untuk efisiensi pakan. Perbedaan konsentrasi metabolit tertentu dapat digunakan sebagai biomarker seleksi dini. Sebagai contoh, ikan dengan efisiensi pakan tinggi sering menunjukkan profil metabolik yang ditandai oleh pemanfaatan asam amino yang lebih efisien, tingkat stres oksidatif lebih rendah, serta kapasitas oksidasi lipid yang lebih baik dibandingkan individu dengan efisiensi rendah.

Integrasi data metabolomik dengan genomik menghasilkan pendekatan *multi-omics* yang memberikan pemahaman lebih menyeluruh tentang hubungan antara genotip dan fenotip metabolik. Variasi genetik pada gen metabolisme tertentu dapat dikaitkan langsung dengan perubahan profil metabolit dan performa produksi. Dengan pendekatan ini, peneliti dapat mengidentifikasi kombinasi marker genetik dan biomarker metabolik yang paling akurat untuk memprediksi efisiensi nutrisi ikan sejak fase juvenil. Model prediksi berbasis integrasi genomik dan metabolomik juga memungkinkan pembangunan sistem *precision breeding* dalam akuakultur. Data SNP genomik, ekspresi gen, dan profil metabolit dapat dianalisis menggunakan *machine learning* dan model statistik multivariat untuk memprediksi performa individu secara lebih presisi dibandingkan seleksi konvensional. Pendekatan ini mempercepat proses seleksi sekaligus meningkatkan akurasi pemuliaan.

Selain untuk efisiensi pakan, biomarker metabolik juga memiliki potensi besar dalam seleksi ikan tahan stres lingkungan, tahan penyakit, dan adaptif terhadap formulasi pakan alternatif. Dengan demikian, integrasi metabolomik dan genomik tidak hanya meningkatkan

produktivitas, tetapi juga mendukung pengembangan strain ikan yang lebih resilien terhadap tantangan budidaya modern dan perubahan lingkungan global.



# BAB X
# *ARTIFICIAL INTELLIGENCE* DAN *BIG DATA* DALAM PEMULIAAN IKAN

## A. *Digital Aquaculture* dan *Smart Breeding*

Era Industri 4.0 telah merambah sektor akuakultur, melahirkan konsep *digital aquaculture* atau *smart aquaculture* yang mengintegrasikan teknologi sensor, *Internet of Things* (IoT), komputasi awan (*cloud computing*), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI), dan analitik data besar (*big data analytics*) ke dalam manajemen dan pengembangan sistem budidaya ikan. Dalam konteks pemuliaan, digitalisasi membuka peluang untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menginterpretasikan data dalam skala dan kecepatan yang sebelumnya tidak mungkin dicapai (Føre et al., 2018).

*Smart breeding* pemuliaan ikan yang dipandu oleh teknologi digital dan AI merepresentasikan konvergensi antara genomik presisi, fenotipik otomatis, dan prediksi genomik berbasis *machine learning*. Sistem sensor bawah air yang dilengkapi kamera, *hydroacoustic transducer*, dan sensor lingkungan dapat secara otomatis mengumpulkan data performa ikan (laju pertumbuhan, aktivitas perenangan, konsumsi pakan, perilaku) dalam skala yang sebelumnya membutuhkan tenaga kerja yang sangat besar. Data ini, diintegrasikan dengan informasi genomik, membentuk dasar untuk prediksi performa yang jauh lebih akurat dan keputusan seleksi yang lebih tepat (Føre et al., 2018).

Platform digital terintegrasi untuk manajemen program pemuliaan ikan telah mulai dikembangkan oleh beberapa perusahaan

teknologi dan lembaga penelitian. Sistem-sistem ini mengintegrasikan manajemen data pedigree, hasil genotipasi, data fenotipik dari berbagai sumber, kalkulasi EBV/GEBV secara otomatis, serta rekomendasi *mating design* yang mempertimbangkan optimasi kemajuan genetik dan pengendalian inbreeding secara simultan (Meuwissen et al., 2016).

## 1. Konsep *Digital Aquaculture* dalam Pemuliaan Ikan

*Digital aquaculture* atau akuakultur digital merupakan transformasi sistem budidaya ikan berbasis teknologi digital yang mengintegrasikan sensor otomatis, *Internet of Things* (IoT), *cloud computing*, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI), serta analisis *big data* ke dalam seluruh rantai produksi akuakultur. Teknologi ini memungkinkan proses monitoring, pengambilan keputusan, dan pengelolaan budidaya dilakukan secara *real time*, presisi, dan berbasis data (Føre et al., 2018). Dalam bidang pemuliaan ikan, *digital aquaculture* menghadirkan pendekatan baru yang dikenal sebagai *smart breeding*, yaitu sistem pemuliaan yang memanfaatkan integrasi data genomik, fenotipik, dan lingkungan secara otomatis untuk meningkatkan akurasi seleksi genetik. Sebelumnya, pengumpulan data fenotip seperti pertumbuhan, konsumsi pakan, dan perilaku ikan dilakukan secara manual dan memerlukan tenaga kerja besar. Dengan teknologi digital, data tersebut kini dapat dikumpulkan secara kontinu melalui sensor otomatis dan sistem monitoring berbasis AI.

Teknologi sensor bawah air memainkan peran penting dalam *smart breeding*. Kamera bawah air berbasis *computer vision* dapat digunakan untuk mengukur ukuran tubuh, biomassa, dan pola pergerakan ikan secara otomatis tanpa perlu penangkapan fisik. *Hydroacoustic transducer* memungkinkan estimasi kepadatan populasi dan aktivitas renang ikan secara *real time*, sedangkan sensor kualitas air memonitor parameter lingkungan seperti suhu, oksigen terlarut, pH, salinitas, dan amonia yang sangat memengaruhi performa genetik ikan. Integrasi data lingkungan dengan data biologis memungkinkan identifikasi hubungan antara genotip dan respons ikan terhadap kondisi budidaya tertentu. Dengan demikian, seleksi tidak hanya didasarkan pada performa rata-rata, tetapi juga pada stabilitas performa di bawah variasi lingkungan. Pendekatan ini sangat penting dalam menghadapi perubahan iklim dan sistem budidaya intensif yang semakin kompleks.

Selain meningkatkan akurasi seleksi, *digital aquaculture* juga meningkatkan efisiensi operasional program pemuliaan. Pengumpulan data otomatis mengurangi *human error*, meningkatkan kapasitas monitoring populasi besar, dan mempercepat proses evaluasi performa ikan. Teknologi ini menjadi fondasi utama pengembangan *precision aquaculture*, yaitu sistem budidaya berbasis data yang mampu mengoptimalkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan.

## 2. *Artificial Intelligence* dan *Big Data* dalam *Smart Breeding*

Perkembangan *Artificial Intelligence* (AI) dan *machine learning* telah membawa perubahan besar dalam analisis data pemuliaan ikan modern. Program pemuliaan saat ini menghasilkan data dalam jumlah sangat besar yang berasal dari genomik, *transcriptomics*, sensor lingkungan, citra visual, hingga perilaku ikan. Analisis manual terhadap data tersebut menjadi semakin sulit dilakukan, sehingga AI digunakan untuk mengidentifikasi pola kompleks yang tidak dapat dideteksi melalui metode statistik konvensional. *Machine learning* memungkinkan pembangunan model prediksi performa genetik berbasis kombinasi data *multi-omics* dan fenotipik. Algoritma seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *Deep Learning*, dan *Neural Networks* digunakan untuk memprediksi pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pakan, dan toleransi lingkungan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Model ini dapat mengidentifikasi hubungan non-linear antara marker genomik dan sifat produksi yang kompleks.

Dalam *smart breeding*, AI juga digunakan untuk *automated phenotyping* atau fenotipisasi otomatis. Sistem *computer vision* berbasis *deep learning* mampu mengenali individu ikan, menghitung panjang dan bobot tubuh, mendeteksi deformitas morfologi, hingga menganalisis perilaku berenang sebagai indikator kesehatan dan stres. Teknologi ini memungkinkan evaluasi performa dilakukan secara kontinu tanpa mengganggu aktivitas normal ikan di dalam sistem budidaya. *Big data analytics* menjadi komponen penting karena program pemuliaan modern menghasilkan jutaan data dari ribuan individu ikan dalam waktu singkat. Platform *cloud computing* memungkinkan penyimpanan dan pemrosesan data dalam kapasitas besar secara terintegrasi. Data pedigree, hasil genotipasi SNP, data kualitas air, konsumsi pakan, dan performa pertumbuhan dapat dianalisis secara simultan untuk

menghasilkan nilai *Estimated Breeding Value* (EBV) atau *Genomic Estimated Breeding Value* (GEBV) secara otomatis.

Selain untuk prediksi performa, AI juga digunakan dalam optimasi *mating design* atau rancangan perkawinan. Sistem algoritma dapat memilih kombinasi induk terbaik dengan mempertimbangkan kemajuan genetik maksimum sekaligus meminimalkan tingkat inbreeding. Pendekatan ini membantu menjaga keragaman genetik populasi dalam jangka panjang. Pengembangan *smart breeding* berbasis AI menunjukkan bahwa masa depan pemuliaan ikan akan semakin bergantung pada integrasi teknologi digital, genomik, dan analitik data cerdas. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kecepatan dan akurasi seleksi, tetapi juga memungkinkan pengembangan sistem akuakultur yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan di era transformasi digital global.

## B. AI untuk Prediksi Karakter Genetik

Kecerdasan buatan, khususnya teknik *machine learning* dan *deep learning*, telah menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan dalam meningkatkan akurasi prediksi karakter genetik ikan melampaui kemampuan metode statistik konvensional seperti GBLUP. *Machine learning algorithm* seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine* (SVM), *Gradient Boosting*, dan jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Networks*) mampu menangkap pola non-linear dan interaksi kompleks antar SNP yang tidak dapat dimodelkan secara efisien oleh metode linier tradisional (Howard et al., 2019).

*Deep learning* menggunakan arsitektur jaringan saraf berlapis dalam (*deep neural networks*) untuk mempelajari representasi fitur hierarkis dari data genomik secara otomatis, tanpa perlu spesifikasi model apriori dari peneliti. *Convolutional Neural Networks* (CNN) yang awalnya dikembangkan untuk pengenalan gambar telah berhasil diadaptasi untuk pemodelan data genomik dengan mengeksploitasi struktur LD (*linkage disequilibrium*) dalam genom sebagai analogi dari struktur spasial dalam gambar. Pendekatan ini menunjukkan peningkatan akurasi prediksi yang signifikan untuk beberapa sifat kompleks pada dataset genomik berukuran besar (Bellot et al., 2018).

Dalam konteks akuakultur, aplikasi kecerdasan buatan untuk prediksi genomik masih relatif baru namun berkembang pesat. Studi

awal pada salmon Atlantik dan udang menunjukkan bahwa algoritma *machine learning* seperti *Random Forest* dan *XGBoost* dapat memberikan akurasi prediksi yang sebanding atau sedikit lebih baik dibandingkan GBLUP untuk beberapa sifat, terutama ketika terdapat interaksi epistasis yang signifikan. Tantangan utama yang masih perlu diatasi adalah risiko *overfitting* pada dataset genomik berdimensi tinggi dan kebutuhan data *training* yang besar (Howard et al., 2019).

Tabel 12. Perbandingan Algoritma *Artificial Intelligent/Machine Learning* untuk *Genomic Prediction* dalam Program Pemuliaan Ikan

| **Algoritma *Artificial Intelligent/Machine Learning*** | **Karakteristik** | **Keunggulan untuk Genomik** | **Keterbatasan** |
|---|---|---|---|
| GBLUP (*baseline*) | *Linear, Bayesian ridge* | Standar, *interpretable* | Tidak menangkap non-linear |
| *Random Forest* | *Ensemble decision trees* | *Robust, feature importance* | Memori intensif, lambat |
| *Gradient Boosting* (XGBoost) | *Boosting sequensial* | Akurasi tinggi, efisien | Hyperparameter tuning kompleks |
| *Support Vector Machine* | *Kernel-based classifier* | Efektif dimensi tinggi | Tidak skalabel untuk n besar |
| *Artificial Neural Network* | *Multi-layer perceptron* | Menangkap *non-linearity* | *Black-box*, perlu data besar |
| *Convolutional Neural Network* | *Spatial feature learning* | Eksploitasi struktur LD | Komputasi sangat intensif |
| *Transformer* (BERT-*based*) | *Attention mechanism* | *Context-aware genomic rep*. | Sangat baru, validasi terbatas |

Tabel 12 menunjukkan perbandingan berbagai algoritma kecerdasan buatan (AI) dan *machine learning* (ML) yang digunakan untuk *genomic prediction* dalam program pemuliaan ikan, mencakup karakteristik dasar, keunggulan dalam analisis data genomik, serta keterbatasan masing-masing metode. Perbedaan pendekatan ini penting karena setiap algoritma memiliki kemampuan yang berbeda dalam menangkap pola genetik kompleks, khususnya pada data SNP berukuran besar dan berdimensi tinggi.

Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa perkembangan *Artificial Intelligent/Machine Learning* dalam *genomic prediction* telah bergerak dari model linear tradisional menuju model non-linear yang semakin kompleks dan adaptif. Setiap algoritma memiliki *trade-off* antara akurasi, interpretabilitas, dan kebutuhan komputasi. Dalam konteks pemuliaan ikan modern, pemilihan algoritma sangat bergantung pada ukuran dataset, kompleksitas sifat yang dianalisis, serta tujuan utama, apakah untuk prediksi akurasi tinggi atau interpretasi biologis dari variabel genetik yang terlibat.

## 1. *Machine Learning* dalam Prediksi Genomik Ikan

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI), khususnya *machine learning*, telah menjadi teknologi penting dalam pengembangan *genomic prediction* modern pada program pemuliaan ikan. *Machine learning* memungkinkan analisis hubungan kompleks antara ribuan hingga jutaan marker genetik dengan sifat fenotipik seperti pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pakan, dan toleransi lingkungan. Pendekatan ini menawarkan kemampuan yang lebih fleksibel dibandingkan metode statistik konvensional seperti GBLUP yang umumnya berbasis asumsi linear (Howard et al., 2019). Dalam *genomic prediction*, *machine learning* bekerja dengan mempelajari pola hubungan antara data genomik dan performa fenotipik melalui proses *training* menggunakan dataset besar. Setelah model terbentuk, sistem dapat memprediksi performa genetik individu baru hanya berdasarkan data SNP genomiknya. Pendekatan ini sangat berguna dalam akuakultur karena banyak sifat ekonomi penting dikendalikan oleh banyak gen kecil (*polygenic traits*) dengan interaksi kompleks antar gen.

*Random Forest* merupakan salah satu algoritma *machine learning* yang paling banyak digunakan dalam *genomic prediction*. Metode ini membangun ratusan hingga ribuan *decision tree* secara

paralel dan menggabungkan hasil prediksi untuk meningkatkan akurasi. Dalam pemuliaan ikan, *Random Forest* mampu mengidentifikasi SNP penting yang berkaitan dengan pertumbuhan dan resistensi penyakit sekaligus menangani data genomik yang mengandung *noise* dan *missing values*. *Gradient Boosting* dan *XGBoost* menjadi pendekatan yang semakin populer karena memiliki akurasi tinggi dan efisiensi komputasi yang baik. Algoritma ini bekerja secara bertahap dengan memperbaiki kesalahan prediksi model sebelumnya, sehingga sangat efektif untuk mendeteksi hubungan non-linear antar marker genetik. Pada beberapa studi akuakultur, *XGBoost* menunjukkan performa lebih baik dibandingkan GBLUP untuk sifat yang dipengaruhi interaksi epistasis.

*Support Vector Machine* (SVM) juga digunakan dalam analisis genomik karena efektif menangani data berdimensi tinggi. Dengan pendekatan *kernel-based learning*, SVM mampu memisahkan pola genetik kompleks pada ruang multidimensi. Namun, keterbatasannya adalah kebutuhan komputasi yang tinggi ketika jumlah sampel meningkat sangat besar. Keunggulan utama *machine learning* dalam pemuliaan ikan adalah kemampuannya menangkap pola genetik non-linear dan interaksi kompleks antar SNP yang sulit dimodelkan secara statistik tradisional. Hal ini sangat relevan karena banyak sifat biologis penting pada ikan tidak dikendalikan oleh satu gen tunggal, melainkan oleh jaringan regulasi gen yang saling berinteraksi secara dinamis. Meskipun demikian, penerapan *machine learning* juga memiliki tantangan. Dataset genomik ikan sering kali memiliki jumlah marker sangat besar tetapi jumlah individu relatif terbatas, sehingga meningkatkan risiko *overfitting*. Oleh karena itu, validasi silang (*cross-validation*), optimasi *hyperparameter*, dan penggunaan dataset *training* yang besar menjadi faktor penting untuk memastikan model prediksi tetap stabil dan akurat.

## 2. *Deep Learning* dan Masa Depan Prediksi Genetik Akuakultur

Perkembangan *deep learning* membawa kemampuan analisis AI ke tingkat yang lebih maju dalam *genomic prediction*. *Deep learning* menggunakan jaringan saraf tiruan berlapis banyak (*deep neural networks*) yang mampu mempelajari representasi data secara otomatis tanpa perlu menentukan model biologis secara eksplisit. Pendekatan ini sangat cocok untuk data genomik yang kompleks dan memiliki pola interaksi multidimensi (Bellot et al., 2018). *Artificial Neural Network*

(ANN) merupakan bentuk dasar *deep learning* yang mampu menangkap hubungan non-linear antar *marker* genetik. ANN terdiri dari *input layer*, *hidden layer*, dan *output layer* yang saling terhubung melalui bobot matematis. Dalam pemuliaan ikan, ANN digunakan untuk memprediksi nilai *breeding value* berdasarkan kombinasi ribuan *single nucleotide polymorphisms* (SNP) secara simultan. Sistem ini mampu mempelajari pola genetik kompleks yang berkaitan dengan pertumbuhan, ketahanan penyakit, dan efisiensi metabolik.

*Convolutional Neural Network* (CNN) merupakan pengembangan *deep learning* yang awalnya dirancang untuk pengolahan citra digital, tetapi kemudian diadaptasi untuk data genomik. CNN memanfaatkan struktur *linkage disequilibrium* (LD) antar SNP sebagai pola spasial yang mirip dengan struktur piksel pada gambar. Dengan pendekatan ini, CNN dapat mengenali pola lokal dalam genom yang berhubungan dengan sifat biologis tertentu secara lebih efektif dibanding metode linear tradisional. Selain CNN, teknologi *Transformer* berbasis *attention mechanism* mulai diperkenalkan dalam analisis genomik modern. Model seperti *BERT* genomik mampu memahami hubungan antar posisi dalam urutan DNA secara global dan kontekstual. Pendekatan ini sangat potensial untuk mendeteksi interaksi gen kompleks serta hubungan jarak jauh antar wilayah genom yang sebelumnya sulit dianalisis menggunakan model konvensional.

Dalam akuakultur, *deep learning* memiliki potensi besar untuk mengintegrasikan data *multi-omics* seperti genomik, *transcriptomics*, *proteomics*, *metabolomics*, dan data lingkungan secara simultan. Integrasi ini memungkinkan pembangunan sistem *predictive breeding* yang jauh lebih akurat dan adaptif terhadap perubahan lingkungan budidaya. AI juga berpotensi dikombinasikan dengan teknologi *smart aquaculture* seperti sensor *Internet of Things* (IoT), *computer vision*, dan *monitoring* perilaku otomatis. Data pertumbuhan, konsumsi pakan, aktivitas berenang, dan kualitas air dapat dianalisis secara *real time* bersama data genomik untuk menghasilkan model prediksi performa yang sangat presisi. Pendekatan ini menjadi fondasi utama *precision breeding* dalam akuakultur masa depan.

Namun demikian, penerapan *deep learning* masih menghadapi beberapa tantangan utama, seperti kebutuhan data *training* yang sangat besar, kebutuhan komputasi tinggi, serta rendahnya interpretabilitas biologis karena sebagian besar model bekerja sebagai *black-box system*.

Oleh sebab itu, penelitian saat ini mulai mengarah pada pengembangan *explainable artificial intelligence* (XAI) yang bertujuan meningkatkan kemampuan interpretasi biologis dari hasil prediksi model *deep learning*. Perkembangan AI dan *deep learning* menunjukkan bahwa masa depan pemuliaan ikan akan bergerak menuju sistem seleksi berbasis data besar, otomatisasi, dan analisis prediktif cerdas. Integrasi teknologi ini diharapkan mampu mempercepat kemajuan genetik, meningkatkan efisiensi produksi, serta mendukung keberlanjutan industri akuakultur global di era digital.

## C. *Big Data* Akuakultur

*Big data* dalam akuakultur mencakup volume data yang sangat besar, beragam (*variety*), yang dihasilkan dengan kecepatan tinggi (*velocity*), dan yang memerlukan metode khusus untuk disimpan, diproses, dan dianalisis (*volume, variety, velocity* atau *3V's of big data*). Sumber-sumber data utama dalam ekosistem digital akuakultur meliputi: data genomik (*single nucleotide polymorphism array*, *sequencing*), data lingkungan (sensor suhu, oksigen, pH, salinitas, amonia), data manajemen budidaya (*feeding records*, *mortality logs*, *treatment records*), data fenotipik (*biomass sampling*, *grading data*), dan data gambar/video dari kamera bawah air (Føre et al., 2018).

Infrastruktur untuk mengelola *big data* akuakultur melibatkan arsitektur *cloud computing* yang *scalable*, *database* yang dirancang untuk data *time-series* sensor, sistem manajemen data genomik yang terstruktur, dan platform analitik yang mendukung pemrosesan paralel. Standardisasi format data dan protokol pertukaran data antar sistem yang berbeda merupakan tantangan teknis yang signifikan dalam pengembangan ekosistem digital akuakultur yang terintegrasi (Føre et al., 2018).

Nilai strategis *big data* akuakultur terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan wawasan yang tidak mungkin diperoleh dari analisis data skala kecil. Pola penyakit yang bersifat musiman atau regional, korelasi antara parameter lingkungan dengan performa produksi, dan tren genetik populasi yang berkembang dari waktu ke waktu hanya dapat teridentifikasi ketika data dari banyak siklus produksi, lokasi, dan sistem yang berbeda dianalisis secara terpadu (Nguyen, 2016).

## 1. Konsep dan Infrastruktur *Big Data* dalam Akuakultur

*Big data* dalam akuakultur merujuk pada kumpulan data berukuran sangat besar dan kompleks yang dihasilkan dari berbagai aktivitas budidaya perikanan modern. Konsep ini umumnya dijelaskan melalui pendekatan *3V*, yaitu *volume* (jumlah data yang sangat besar), *variety* (keragaman jenis data), dan *velocity* (kecepatan aliran data). Dalam perkembangannya, konsep *big data* juga mencakup *veracity* (akurasi data) dan *value* (nilai informasi) yang dihasilkan dari proses analisis data tersebut. Dalam sistem akuakultur modern, data dihasilkan secara terus-menerus dari sensor kualitas air, perangkat *Internet of Things* (IoT), sistem pemberian pakan otomatis, data produksi, hingga analisis genomik ikan.

Sumber data dalam akuakultur sangat beragam. Data lingkungan diperoleh dari sensor otomatis yang memantau suhu, pH, kadar oksigen terlarut, salinitas, amonia, dan parameter kualitas air lainnya secara *real-time*. Selain itu, terdapat data genomik berupa *sequencing* DNA, *single nucleotide polymorphism array* (SNP *array*), dan *marker* molekuler yang digunakan dalam program pemuliaan ikan. Data fenotipik seperti pertumbuhan, biomassa, ukuran tubuh, dan tingkat kelangsungan hidup juga menjadi bagian penting dalam sistem *big data* akuakultur. Teknologi kamera bawah air dan *drone* bahkan memungkinkan pengumpulan data visual untuk memantau perilaku ikan, efisiensi pakan, dan deteksi dini penyakit.

Pengelolaan *big data* membutuhkan infrastruktur digital yang kuat dan terintegrasi. Teknologi *cloud computing* digunakan untuk menyediakan kapasitas penyimpanan data yang fleksibel dan *scalable* sesuai kebutuhan industri. *Database* khusus *time-series* dikembangkan untuk menyimpan data sensor yang diperbarui secara kontinu, sedangkan platform analitik modern mendukung pemrosesan paralel dan integrasi *machine learning* untuk mempercepat proses analisis data. Meskipun demikian, implementasi *big data* dalam akuakultur masih menghadapi berbagai tantangan seperti standardisasi format data, interoperabilitas antarperangkat, keamanan data, dan keterbatasan infrastruktur digital di beberapa wilayah.

## 2. Pemanfaatan *Big Data* dalam *Smart Aquaculture*

Pemanfaatan *big data* dalam *smart aquaculture* menjadi salah satu pilar utama transformasi digital dalam sistem budidaya ikan modern.

*Big data* merujuk pada kumpulan data berukuran sangat besar, kompleks, dan terus berkembang yang berasal dari berbagai sumber, seperti sensor lingkungan, sistem pemantauan otomatis, data genetik, catatan produksi, serta data perilaku ikan. Dalam konteks akuakultur, data ini tidak hanya dikumpulkan dalam jumlah besar, tetapi juga memiliki variasi yang tinggi dan diperbarui secara real-time, sehingga membutuhkan pendekatan analitik yang mampu mengolahnya secara efisien dan bermakna.

Salah satu kontribusi utama *big data* dalam akuakultur adalah kemampuannya untuk mengintegrasikan berbagai jenis data yang sebelumnya terpisah. Data kualitas air seperti suhu, oksigen terlarut, salinitas, dan pH dapat dikombinasikan dengan data pertumbuhan ikan, konsumsi pakan, serta data genomik individu. Integrasi ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas dan kesehatan ikan. Dengan pendekatan ini, pembudidaya dapat memahami pola hubungan kompleks antara lingkungan, genetik, dan performa biologis ikan secara lebih akurat.

Selain itu, analitik *big data* memungkinkan penerapan model prediktif berbasis kecerdasan buatan untuk mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen budidaya. Model ini dapat digunakan untuk memprediksi laju pertumbuhan, risiko penyakit, kebutuhan pakan, hingga potensi mortalitas berdasarkan pola data historis dan kondisi aktual di lapangan. Dengan demikian, sistem dapat memberikan rekomendasi tindakan secara otomatis, seperti penyesuaian pakan atau perbaikan kualitas air, sebelum masalah menjadi lebih serius. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi operasional sekaligus mengurangi risiko kerugian dalam sistem budidaya intensif.

*Big data* juga memainkan peran penting dalam pemuliaan ikan berbasis presisi atau *precision breeding*. Dengan menggabungkan data fenotipik skala besar, data genotipik, dan data lingkungan, sistem dapat menghitung nilai pemuliaan secara lebih akurat serta mengidentifikasi individu unggul dengan potensi genetik terbaik. Analisis ini mendukung seleksi yang lebih cepat dan tepat, sekaligus membantu mengendalikan *inbreeding* dalam populasi budidaya. Dengan perkembangan teknologi komputasi dan penyimpanan data yang semakin maju, pemanfaatan *big data* diperkirakan akan menjadi fondasi utama dalam pengembangan akuakultur modern yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

## D. *Machine Learning* dalam Seleksi Ikan

Selain untuk *genomic prediction*, *machine learning* telah menemukan berbagai aplikasi inovatif dalam *pipeline* seleksi ikan secara lebih luas. *Computer Vision* (CV) berbasis *deep learning* memungkinkan pengukuran otomatis parameter morfometrik ikan (panjang, tinggi badan, panjang kepala) dari gambar atau video tanpa perlu kontak fisik dengan ikan, mengurangi stres penanganan dan memungkinkan pengukuran populasi yang jauh lebih besar dalam waktu yang lebih singkat (Zhao et al., 2021).

Analisis perilaku otomatis berbasis AI dari rekaman video ikan telah menunjukkan potensi untuk mendeteksi penurunan kesehatan, stres, atau infeksi penyakit jauh lebih awal dari gejala klinis yang terlihat oleh pengamatan manusia. Pola perenangan yang tidak normal, penurunan aktivitas makan, dan perubahan distribusi ruang di dalam kolam atau keramba dapat dideteksi secara otomatis oleh algoritma *machine learning* yang telah dilatih dengan data perilaku normal dan abnormal, memungkinkan intervensi manajemen yang lebih cepat dan tepat sasaran (Føre et al., 2018).

*Reinforcement Learning* (RL), cabang *machine learning* yang mempelajari pengambilan keputusan optimal melalui interaksi dengan lingkungan, telah mulai dieksplorasi untuk optimasi strategi manajemen pakan secara otomatis dalam sistem RAS. Sistem RL dapat belajar untuk mengoptimalkan jadwal, frekuensi, dan jumlah pemberian pakan berdasarkan sinyal umpan balik dari sensor konsumsi pakan dan pertumbuhan ikan, secara dinamis menyesuaikan strategi *feeding* untuk memaksimalkan *feed conversion ratio* (FCR) dalam kondisi yang berubah-ubah (Zhao et al., 2021).

### 1. *Computer Vision* dan Analisis Morfometrik Otomatis

*Machine learning*, khususnya melalui pendekatan *deep learning*, telah merevolusi proses seleksi ikan dengan memungkinkan analisis morfometrik secara otomatis berbasis *Computer Vision* (CV). Teknologi ini memungkinkan pengukuran karakteristik fisik ikan seperti panjang tubuh, tinggi badan, dan panjang kepala langsung dari gambar atau video tanpa perlu kontak fisik. Hal ini tidak hanya mempercepat proses pengukuran, tetapi juga mengurangi stres pada ikan akibat penanganan

manual, sehingga data yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi alami ikan.

Dengan memanfaatkan model *deep learning* yang dilatih menggunakan ribuan hingga jutaan data citra ikan, sistem dapat melakukan identifikasi dan pengukuran secara akurat dalam skala besar. Pendekatan ini sangat penting dalam program pemuliaan modern karena memungkinkan evaluasi fenotipe dalam jumlah populasi yang jauh lebih besar dibandingkan metode konvensional. Selain itu, integrasi sistem kamera bawah air dan teknologi *edge computing* memungkinkan analisis dilakukan secara real-time langsung di lokasi budidaya, sehingga proses seleksi menjadi lebih efisien dan cepat (Zhao *et al*., 2021).

## 2. Analisis Perilaku dan Optimasi Manajemen Pakan Berbasis AI

Selain analisis morfometrik, *machine learning* juga banyak digunakan untuk menganalisis perilaku ikan sebagai indikator kesehatan dan kesejahteraan. Melalui rekaman video kontinu, algoritma AI dapat mendeteksi pola pergerakan ikan, tingkat aktivitas makan, serta distribusi spasial ikan di dalam kolam atau keramba. Perubahan kecil dalam pola perilaku sering kali menjadi indikator awal adanya stres, penurunan kualitas air, atau infeksi penyakit sebelum gejala klinis terlihat secara kasat mata. Sistem berbasis AI mampu membedakan antara perilaku normal dan abnormal dengan tingkat akurasi yang tinggi setelah dilatih menggunakan data historis. Deteksi dini ini memungkinkan intervensi manajemen yang lebih cepat dan tepat sasaran, sehingga risiko kerugian produksi dapat ditekan secara signifikan (Føre *et al*., 2018). Selain itu, teknologi ini juga berperan penting dalam meningkatkan kesejahteraan ikan (*fish welfare*) melalui pemantauan kondisi lingkungan dan perilaku secara berkelanjutan.

*Reinforcement Learning* (RL) mulai diterapkan dalam optimasi strategi pemberian pakan, khususnya pada sistem *Recirculating Aquaculture System* (RAS). *Reinforcement Learning* bekerja dengan cara belajar dari interaksi antara sistem dan lingkungan untuk menentukan strategi terbaik dalam pemberian pakan, termasuk waktu, frekuensi, dan jumlah pakan yang optimal. Sistem ini memanfaatkan umpan balik dari sensor konsumsi pakan dan pertumbuhan ikan untuk terus menyesuaikan kebijakan feeding secara dinamis. Tujuan utamanya adalah memaksimalkan efisiensi konversi pakan (*Feed Conversion*

*Ratio*/FCR) sekaligus menjaga kesehatan dan pertumbuhan ikan secara optimal (Zhao *et al*., 2021).

## E. Masa Depan Akuakultur Presisi

Akuakultur presisi merupakan arah perkembangan utama dalam industri budidaya ikan modern yang menggabungkan berbagai teknologi canggih ke dalam satu sistem pengelolaan yang terintegrasi. Konsep ini memadukan genomik presisi, sensor berbasis *Internet of Things*, kecerdasan buatan, komputasi awan, serta analitik *big data* untuk menciptakan sistem budidaya yang mampu bekerja secara adaptif, responsif, dan berbasis data real-time. Dalam sistem ini, setiap keputusan manajemen tidak lagi hanya bergantung pada pengalaman atau observasi manual, tetapi didasarkan pada data yang dikumpulkan secara terus-menerus dari lingkungan budidaya dan organisme yang dipelihara. Dengan pendekatan ini, akuakultur bergerak dari sistem konvensional menuju sistem cerdas yang mampu melakukan pengambilan keputusan secara otomatis maupun semi-otomatis dengan tingkat presisi yang jauh lebih tinggi (Føre et al., 2018).

Perkembangan akuakultur presisi memungkinkan pengelolaan budidaya dilakukan secara lebih detail hingga tingkat individu ikan. Hal ini berarti setiap ikan atau kelompok kecil ikan dapat dipantau secara spesifik berdasarkan parameter biologis dan lingkungannya, seperti laju pertumbuhan, konsumsi pakan, perilaku berenang, kondisi kesehatan, serta respons terhadap perubahan kualitas air. Data tersebut dikumpulkan melalui berbagai perangkat sensor seperti kamera bawah air, sensor kualitas air, dan sistem akustik, kemudian diolah menggunakan algoritma kecerdasan buatan untuk menghasilkan rekomendasi tindakan yang optimal. Dengan cara ini, manajemen pakan, pengendalian penyakit, dan pengaturan lingkungan dapat dilakukan secara lebih efisien, sehingga mengurangi pemborosan sumber daya dan meningkatkan produktivitas sistem budidaya secara keseluruhan.

Salah satu komponen penting dalam akuakultur presisi adalah konsep *digital twin*, yaitu model virtual dari sistem budidaya fisik yang terus diperbarui secara real-time berdasarkan data sensor. Model ini memungkinkan simulasi berbagai skenario manajemen tanpa harus melakukan percobaan langsung di lapangan, seperti perubahan strategi pemberian pakan, kepadatan tebar, jadwal panen, atau perubahan kondisi

lingkungan. Melalui simulasi ini, pembudidaya dapat mengevaluasi berbagai kemungkinan hasil sebelum mengambil keputusan, sehingga risiko kerugian dapat ditekan secara signifikan. Selain itu, *digital twin* juga memungkinkan optimasi sistem produksi secara berkelanjutan karena setiap perubahan kondisi dapat langsung dianalisis dampaknya terhadap performa budidaya.

Dalam konteks pemuliaan ikan, akuakultur presisi membawa perubahan besar dalam cara seleksi dan evaluasi genetik dilakukan. Integrasi antara data genomik, data fenotipik real-time, dan data lingkungan memungkinkan estimasi nilai pemuliaan yang lebih akurat dan dinamis. Nilai pemuliaan tidak lagi bersifat statis, tetapi dapat diperbarui secara berkelanjutan selama siklus hidup ikan berdasarkan data yang terus masuk dari sistem pemantauan. Hal ini memungkinkan proses seleksi induk dilakukan dengan mempertimbangkan berbagai aspek secara simultan, seperti pertumbuhan, ketahanan penyakit, efisiensi pakan, adaptasi lingkungan, serta kontribusi terhadap keragaman genetik populasi. Dengan demikian, akuakultur presisi tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi, tetapi juga merevolusi sistem pemuliaan ikan menjadi lebih cepat, lebih akurat, dan sepenuhnya berbasis data yang terintegrasi (Meuwissen et al., 2016).

Secara keseluruhan, masa depan akuakultur presisi mengarah pada sistem budidaya yang sepenuhnya terhubung, adaptif, dan cerdas. Integrasi antara teknologi digital, bioteknologi, dan analitik data akan menciptakan ekosistem produksi ikan yang mampu merespons perubahan lingkungan secara cepat, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, serta meningkatkan keberlanjutan industri perikanan. Dengan perkembangan teknologi yang terus berlangsung, akuakultur presisi diproyeksikan menjadi standar baru dalam industri budidaya ikan global yang tidak hanya berfokus pada peningkatan produktivitas, tetapi juga pada efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan sistem produksi di masa depan.



# BAB XI
# ETIKA, REGULASI, DAN KEBERLANJUTAN PEMULIAAN BERBASIS BIOTEKNOLOGI

## A. Bioetika Rekayasa Genetik Akuatik

Bioetika adalah cabang filsafat yang mengkaji pertanyaan-pertanyaan moral yang muncul dari perkembangan ilmu biologi dan kedokteran. Dalam konteks rekayasa genetika akuatik, pertanyaan-pertanyaan bioetika mencakup dimensi yang sangat luas: dari hak-hak ikan sebagai makhluk hidup yang memiliki kapasitas merasakan nyeri, hingga keadilan distributif dalam akses terhadap teknologi genetik canggih bagi berbagai komunitas nelayan dan pembudidaya ikan di seluruh dunia (Kaiser, 2005).

Prinsip-prinsip bioetika yang paling sering diaplikasikan dalam diskusi rekayasa genetika ikan meliputi: (1) *Respect for autonomy* dalam konteks ini berlaku pada masyarakat yang terdampak dan hak mereka untuk memutuskan teknologi apa yang akan diterima dalam komunitas mereka; (2) *Beneficence* rekayasa genetika harus memberikan manfaat yang nyata bagi kesehatan manusia, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan industri perikanan; (3) *Non-maleficence* teknologi tidak boleh menyebabkan kerusakan yang tidak dapat diterima terhadap ekosistem, keanekaragaman hayati, atau keselamatan pangan; dan (4)

*Justice* manfaat dan risiko dari bioteknologi harus didistribusikan secara adil tanpa diskriminasi (Kaiser, 2005).

Isu etika yang sangat spesifik dalam rekayasa genetika ikan mencakup: perdebatan tentang 'naturalness' modifikasi genetik dan batasan etis dari manipulasi genetik; pertimbangan kesejahteraan hewan (*animal welfare*) terutama dalam prosedur yang melibatkan uji tantang penyakit dan intervensi genetik; dan pertanyaan tentang 'nilai intrinsik' spesies ikan dan hak mereka untuk tidak dimodifikasi secara fundamental oleh manusia (Palmer, 2011).

## 1. Konsep Dasar dan Prinsip Bioetika dalam Rekayasa Genetik Akuatik

Bioetika merupakan cabang filsafat yang membahas persoalan moral yang muncul akibat perkembangan ilmu biologi, kedokteran, dan bioteknologi. Dalam konteks rekayasa genetik akuatik, bioetika tidak hanya membahas aspek teknis, tetapi juga menyangkut dimensi moral, sosial, dan ekologis dari manipulasi genetik organisme perairan. Isu yang muncul mencakup hak-hak ikan sebagai makhluk hidup, dampak terhadap ekosistem, serta keadilan akses terhadap teknologi genetik antara negara maju dan berkembang (Kaiser, 2005).

Dalam praktiknya, terdapat empat prinsip utama bioetika yang sering digunakan sebagai kerangka analisis. Pertama adalah *respect for autonomy*, yang dalam konteks ini lebih difokuskan pada hak masyarakat dan pemangku kepentingan untuk menentukan penerimaan atau penolakan terhadap teknologi rekayasa genetik di wilayah mereka. Kedua adalah *beneficence*, yaitu bahwa setiap inovasi genetik harus memberikan manfaat nyata bagi peningkatan produksi pangan, kesejahteraan ekonomi, dan keberlanjutan lingkungan. Ketiga adalah *non-maleficence*, yang menekankan bahwa teknologi tidak boleh menimbulkan kerusakan yang tidak dapat diterima terhadap ekosistem, keanekaragaman hayati, maupun keamanan pangan. Keempat adalah *justice*, yaitu prinsip keadilan dalam distribusi manfaat dan risiko teknologi agar tidak menimbulkan kesenjangan sosial dan ekonomi (Kaiser, 2005).

## 2. Isu Etika dan Kontroversi dalam Rekayasa Genetik Ikan

Rekayasa genetik ikan memunculkan berbagai isu etika yang kompleks dan masih menjadi perdebatan hingga saat ini. Salah satu isu

utama adalah konsep *naturalness*, yaitu pertanyaan apakah modifikasi genetik dianggap menyimpang dari proses alami evolusi, serta sejauh mana manusia diperbolehkan mengubah struktur genetik organisme hidup. Perdebatan ini sering menjadi dasar penolakan atau penerimaan teknologi GMO (Genetically Modified Organism) di berbagai negara.

Selain itu, isu kesejahteraan hewan (*animal welfare*) menjadi perhatian penting, terutama dalam proses penelitian yang melibatkan uji tantang penyakit, manipulasi genetik, dan eksperimen laboratorium. Rekayasa genetik harus mempertimbangkan potensi penderitaan yang dialami ikan selama proses pengujian maupun produksi. Di sisi lain, terdapat pula diskusi mengenai nilai intrinsik spesies ikan, yaitu pandangan bahwa setiap organisme memiliki nilai moral yang melekat dan tidak sepenuhnya boleh dimanipulasi demi kepentingan manusia. Isu lain yang tidak kalah penting adalah dampak ekologis jika ikan hasil rekayasa genetik lepas ke lingkungan alami, yang berpotensi mengganggu keseimbangan ekosistem dan keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, pengembangan rekayasa genetik akuatik harus selalu mempertimbangkan aspek kehati-hatian (*precautionary principle*) agar risiko jangka panjang dapat diminimalkan (Palmer, 2011).

## B. Keamanan Hayati dan Lingkungan

Keamanan hayati (*biosafety*) dalam konteks akuakultur berbasis bioteknologi berfokus pada pencegahan dan pengelolaan risiko yang timbul dari pelepasan tidak disengaja organisme hasil rekayasa genetika ke lingkungan alami, atau dari dampak tidak langsung teknologi pada ekosistem perairan. Risiko utama yang perlu dikelola mencakup: introgression genetik ke populasi liar, kompetisi dan displacement spesies asli, transfer gen horizontal ke mikroorganisme lingkungan, dan gangguan pada rantai makanan ekosistem akuatik (*National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine*, 2019).

Penilaian risiko ekologis (*Environmental Risk Assessment*/ERA) untuk organisme hasil rekayasa genetika di akuakultur menggunakan kerangka kerja yang mengkombinasikan analisis probabilitas pelepasan, karakterisasi konsekuensi biologis jika pelepasan terjadi, dan estimasi paparan lingkungan. Dokumen panduan dari FAO, OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), dan *Cartagena Protocol*

*on Biosafety* memberikan kerangka kerja internasional untuk pelaksanaan ERA yang komprehensif (FAO/WHO, 2021).

Teknologi konfinement biologis merupakan lapisan keamanan tambahan yang penting untuk memitigasi risiko ekologis dari ikan hasil rekayasa. Metode konfinement yang paling efektif mencakup: (1) produksi populasi triploid yang steril, (2) penggunaan sistem budidaya tertutup (RAS darat) yang terisolasi secara fisik dari badan air alami, (3) rekayasa kebutuhan genetik (*auxotrophy*) sehingga ikan memerlukan suplemen nutrisi tertentu yang tidak tersedia di alam untuk survive, dan (4) pengembangan *'daisy chain gene drives'* yang dibatasi penyebarannya (Van Eenennaam *et al*., 2019).

## 1. Konsep Biosafety dan Penilaian Risiko Ekologis

*Biosafety* merupakan seperangkat prinsip, regulasi, dan praktik yang dirancang untuk mencegah, mengendalikan, serta meminimalkan risiko yang ditimbulkan oleh organisme hidup hasil bioteknologi, termasuk organisme transgenik dan hasil rekayasa genetik. Dalam konteks akuakultur, *biosafety* berfokus pada perlindungan lingkungan perairan, kesehatan manusia, serta keberlanjutan ekosistem dari potensi dampak negatif akibat introduksi organisme baru atau teknologi genetika modern. Prinsip utama *biosafety* mencakup pencegahan pelepasan organisme yang tidak terkendali, pengendalian penyebaran gen asing ke populasi alami, serta memastikan bahwa produk bioteknologi aman digunakan dalam sistem produksi pangan.

Penilaian risiko ekologis merupakan bagian penting dari kerangka *biosafety* yang bertujuan untuk mengevaluasi potensi dampak suatu organisme atau teknologi terhadap lingkungan. Proses ini mencakup analisis terhadap kemungkinan interaksi antara organisme budidaya dengan ekosistem alami, termasuk risiko kompetisi dengan spesies liar, predasi, penyebaran penyakit, serta aliran gen (*gene flow*) ke populasi alam melalui perkawinan silang. Dalam akuakultur, penilaian ini menjadi sangat penting terutama pada penggunaan ikan transgenik atau organisme hasil penyuntingan gen, karena perubahan sifat biologis dapat memengaruhi keseimbangan ekosistem jika terjadi pelepasan ke lingkungan.

Selain itu, penilaian risiko ekologis juga mempertimbangkan aspek ketahanan organisme terhadap kondisi lingkungan dan potensi dampak jangka panjang terhadap biodiversitas. Misalnya, ikan dengan

pertumbuhan yang dipercepat melalui modifikasi genetik dapat memiliki keunggulan kompetitif yang berpotensi mengganggu populasi alami apabila masuk ke habitat liar. Oleh karena itu, analisis risiko tidak hanya dilakukan pada tingkat individu, tetapi juga pada tingkat populasi dan ekosistem secara keseluruhan. Pendekatan ini biasanya melibatkan pemodelan ekologis, studi laboratorium, serta uji coba terkontrol untuk memahami dampak potensial sebelum pelepasan dilakukan secara luas.

*Biosafety* dan penilaian risiko ekologis merupakan fondasi penting dalam penerapan bioteknologi akuakultur modern. Keduanya memastikan bahwa inovasi seperti transgenesis, *CRISPR*, dan seleksi genomik dapat dimanfaatkan secara aman tanpa mengorbankan keseimbangan lingkungan. Dengan penerapan prinsip kehati-hatian dan evaluasi risiko yang ketat, pengembangan teknologi akuakultur dapat berjalan seiring dengan upaya pelestarian ekosistem dan keberlanjutan sumber daya perairan di masa depan.

## 2. Strategi Konfinement dan Mitigasi Risiko Bioteknologi Akuakultur

Untuk mengurangi potensi dampak negatif terhadap lingkungan, berbagai strategi *biological containment* atau konfinement biologis dikembangkan sebagai lapisan keamanan tambahan dalam sistem akuakultur modern. Salah satu metode yang paling umum adalah produksi ikan triploid yang bersifat steril, sehingga tidak dapat berkembang biak jika lepas ke lingkungan alami. Strategi ini secara signifikan menurunkan risiko penyebaran gen hasil rekayasa ke populasi liar.

Selain itu, penggunaan sistem budidaya tertutup seperti *Recirculating Aquaculture System* (RAS) di daratan juga menjadi pendekatan penting karena memisahkan organisme budidaya secara fisik dari ekosistem alami. Pendekatan ini mengurangi kemungkinan interaksi langsung antara ikan hasil rekayasa dengan spesies liar di perairan terbuka. Strategi lain yang lebih canggih adalah rekayasa kebutuhan nutrisi spesifik (*auxotrophy*), di mana ikan dimodifikasi agar memerlukan nutrisi tertentu yang tidak tersedia di alam, sehingga tidak dapat bertahan hidup jika lepas dari sistem budidaya.

Beberapa penelitian juga mengembangkan konsep *gene drive* yang dibatasi, seperti *daisy chain gene drive*, yang dirancang agar penyebaran gen rekayasa tidak berlangsung tanpa batas di populasi alami

(Van Eenennaam *et al*., 2019). Meskipun teknologi ini menjanjikan dari sisi kontrol genetik, penerapannya masih memerlukan kajian etika, ekologis, dan regulasi yang sangat ketat. Dengan demikian, keamanan hayati dalam akuakultur modern tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga pada integrasi antara kebijakan, regulasi, dan prinsip kehati-hatian dalam setiap tahap pengembangan bioteknologi.

## C. Regukasi Nasional dan Internasional

Lanskap regulasi untuk produk bioteknologi akuakultur sangat kompleks dan terus berkembang. Di tingkat internasional, *Cartagena Protocol on Biosafety* (2000) yang merupakan protokol dari *Convention on Biological Diversity* (CBD) mengatur pergerakan lintas batas organisme hidup hasil modifikasi (*Living Modified Organisms/*LMOs), termasuk ikan transgenik. Protokol ini mewajibkan prosedur *Advance Informed Agreement* (AIA) sebelum impor LMO yang akan dilepas ke lingkungan, dengan mempertimbangkan prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) (CBD, 2000).

Di Indonesia, kerangka regulasi untuk keamanan hayati produk rekayasa genetika diatur melalui beberapa instrumen hukum yang saling melengkapi: UU No. 21 Tahun 2004 tentang Pengesahan *Cartagena Protocol on Biosafety*, PP No. 21 Tahun 2005 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetika, Peraturan Menteri Pertanian No. 61 Tahun 2011 tentang Pengujian, Penilaian, Pelepasan, dan Penarikan Varietas, serta regulasi dari Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) yang spesifik untuk sektor perikanan. Koordinasi antar kementerian dan lembaga (Komisi Keamanan Hayati, BPOM, BRIN, KKP) merupakan kunci efektivitas implementasi regulasi ini (KKH, 2019).

Tabel 13. Instrumen Regulasi Utama Nasional dan Internasional yang Mengatur Bioteknologi Akuakultur

| Instrumen Regulasi | Lingkup | Otoritas Pelaksana | Tahun |
|---|---|---|---|
| *Cartagena Protocol on Biosafety* | LMO lintas batas internasional | CBD Secretariat | 2000 |

| Instrumen Regulasi | Lingkup | Otoritas Pelaksana | Tahun |
|---|---|---|---|
| UU No. 21/2004 Indonesia | Ratifikasi *Cartagena Protocol* | Pemerintah RI | 2004 |
| PP No. 21/2005 Indonesia | Keamanan hayati PRG | Komisi KH Nasional | 2005 |
| EU Directive 2001/18/EC | Semua GMO termasuk *gene-edited* | European Commission | 2001 (rev. 2018) |
| US FFDCA (FDA) | Ikan rekayasa = *new animal drug* | US FDA / EPA | Ongoing |
| Codex Alimentarius CAC/GL 45 | Keamanan pangan GMO | FAO/WHO | 2003 (rev. 2021) |
| OECD *Biosafety Guidelines* | Panduan ERA internasional | OECD | Berbagai tahun |

Tabel 13 menggambarkan berbagai instrumen regulasi yang digunakan dalam pengaturan bioteknologi akuakultur pada tingkat nasional maupun internasional, termasuk cakupan pengaturan, lembaga pelaksana, serta tahun penerbitan atau revisi kebijakan. Kerangka regulasi ini menunjukkan bahwa pengembangan dan pemanfaatan organisme hasil rekayasa genetika (*genetically modified organisms*/GMO dan LMO) dalam akuakultur tidak hanya bergantung pada aspek ilmiah, tetapi juga pada kepatuhan terhadap sistem hukum global yang ketat dan berlapis.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa regulasi bioteknologi akuakultur bersifat multi-level governance yang melibatkan organisasi internasional, negara, dan lembaga teknis sektoral. Perbedaan pendekatan antara negara baik berbasis produk maupun berbasis proses menciptakan tantangan harmonisasi global, terutama dalam perdagangan internasional dan pengembangan teknologi gene editing pada ikan budidaya.

## 1. Kerangka Regulasi Internasional Bioteknologi Akuakultur

Lanskap regulasi bioteknologi akuakultur di tingkat internasional bersifat kompleks, berlapis, dan terus berkembang mengikuti kemajuan teknologi genetika modern. Salah satu instrumen paling penting adalah *Cartagena Protocol on Biosafety* (2000) yang berada di bawah *Convention on Biological Diversity* (CBD). Protokol ini mengatur pergerakan lintas batas organisme hidup hasil modifikasi genetika (*Living Modified Organisms*/LMOs), termasuk ikan transgenik, dengan tujuan utama melindungi keanekaragaman hayati dan kesehatan lingkungan. Dalam implementasinya, protokol ini mewajibkan mekanisme *Advance Informed Agreement* (AIA), yaitu prosedur yang mengharuskan negara pengimpor memberikan persetujuan berbasis informasi lengkap sebelum LMOs dilepaskan ke lingkungan. Prinsip kehati-hatian (*precautionary principle*) menjadi dasar utama, yang menekankan bahwa ketidakpastian ilmiah bukan alasan untuk mengabaikan potensi risiko lingkungan (CBD, 2000).

Selain itu, berbagai standar internasional lain juga berperan penting, seperti *Codex Alimentarius* CAC/GL 45 dari FAO/WHO yang mengatur keamanan pangan GMO, serta OECD *Biosafety Guidelines* yang menyediakan panduan ilmiah untuk *Environmental Risk Assessment* (ERA). Di sisi lain, Uni Eropa melalui EU *Directive* 2001/18/EC menerapkan pendekatan berbasis proses (*process-based regulation*) yang sangat ketat terhadap semua GMO, termasuk organisme hasil *gene editing*. Sementara itu, Amerika Serikat menggunakan pendekatan berbasis produk (*product-based regulation*) melalui FFDCA, di mana ikan transgenik dikategorikan sebagai "*new animal drug*" dan dievaluasi oleh FDA (serta EPA dalam aspek tertentu). Perbedaan pendekatan ini menunjukkan belum adanya harmonisasi global dalam regulasi bioteknologi akuakultur.

## 2. Regulasi Nasional Indonesia dan Tata Kelola Keamanan Hayati

Di Indonesia, pengaturan bioteknologi akuakultur dan keamanan hayati organisme hasil rekayasa genetika didasarkan pada beberapa instrumen hukum yang saling melengkapi. Landasan utama adalah UU No. 21 Tahun 2004 yang meratifikasi *Cartagena Protocol on Biosafety*, sebagai bentuk komitmen Indonesia terhadap standar global perlindungan keanekaragaman hayati. Selanjutnya, PP No. 21 Tahun 2005 menjadi regulasi inti yang mengatur keamanan hayati produk

rekayasa genetika, termasuk mekanisme penilaian risiko, uji keamanan, serta prosedur pelepasan ke lingkungan. Pada tingkat teknis, regulasi ini didukung oleh Komisi Keamanan Hayati (KKH) yang bertugas melakukan evaluasi risiko dan memberikan rekomendasi ilmiah terkait penggunaan organisme hasil rekayasa genetika. Di sektor pertanian, Permen Pertanian No. 61 Tahun 2011 mengatur proses pengujian dan pelepasan varietas hasil rekayasa genetika, yang secara prinsip juga menjadi acuan bagi sektor perikanan.

Sementara itu, Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) berperan dalam pengawasan dan implementasi kebijakan di sektor akuakultur, khususnya terkait pengembangan dan pemanfaatan bioteknologi ikan. Dalam praktiknya, efektivitas regulasi sangat bergantung pada koordinasi lintas lembaga, termasuk KKH, BPOM, BRIN, dan KKP, untuk memastikan bahwa inovasi bioteknologi tetap aman secara biologis, ekologis, dan pangan (KKH, 2019). Secara keseluruhan, sistem regulasi bioteknologi akuakultur di tingkat nasional maupun internasional menunjukkan karakter multi-level governance yang kompleks. Perbedaan pendekatan regulasi antarnegara, baik berbasis proses maupun berbasis produk, menjadi tantangan utama dalam harmonisasi kebijakan global, terutama dalam konteks perdagangan internasional dan perkembangan teknologi baru seperti gene editing pada ikan budidaya.

Di Indonesia, pengaturan terkait keamanan hayati atau *biosafety* dalam pemanfaatan bioteknologi, termasuk organisme hasil rekayasa genetik, berada dalam kerangka regulasi yang bertujuan melindungi kesehatan manusia, kelestarian lingkungan, serta keberlanjutan sumber daya hayati. Tata kelola ini melibatkan berbagai lembaga pemerintah dan instrumen hukum yang saling terintegrasi untuk memastikan bahwa setiap aktivitas penelitian, pengembangan, hingga pelepasan organisme hasil bioteknologi telah melalui kajian ilmiah yang ketat. Prinsip kehati-hatian menjadi dasar utama dalam setiap kebijakan, terutama untuk mencegah dampak negatif yang tidak diinginkan terhadap ekosistem perairan dan sektor perikanan.

Kerangka regulasi nasional terkait organisme hasil modifikasi genetik mencakup penilaian keamanan hayati yang meliputi aspek keamanan lingkungan, keamanan pangan, dan keamanan pakan. Proses ini biasanya dilakukan melalui mekanisme evaluasi ilmiah yang melibatkan komite atau lembaga teknis yang berwenang. Setiap produk

bioteknologi yang akan digunakan atau dilepas ke lingkungan wajib melalui tahapan penilaian risiko yang mencakup identifikasi bahaya, analisis kemungkinan dampak, serta strategi pengelolaan risiko. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa penggunaan teknologi seperti organisme transgenik atau hasil penyuntingan gen tidak menimbulkan gangguan terhadap ekosistem alami maupun kesehatan masyarakat.

Dalam sektor akuakultur, tata kelola keamanan hayati juga mencakup pengawasan terhadap kegiatan budidaya, distribusi, dan perdagangan organisme perairan. Pengendalian dilakukan untuk mencegah penyebaran penyakit, invasi spesies asing, serta potensi aliran gen ke populasi liar. Selain itu, sistem sertifikasi dan karantina ikan menjadi bagian penting dalam menjaga kualitas dan keamanan produk perikanan yang beredar di pasar domestik maupun internasional. Upaya ini juga mendukung peningkatan daya saing produk perikanan Indonesia di pasar global dengan memastikan bahwa standar keamanan hayati terpenuhi.

Regulasi nasional dan tata kelola keamanan hayati di Indonesia bertujuan menciptakan keseimbangan antara inovasi teknologi dan perlindungan lingkungan. Dengan adanya sistem pengawasan yang terstruktur dan berbasis ilmiah, pengembangan bioteknologi dalam akuakultur dapat dilakukan secara bertanggung jawab. Hal ini memastikan bahwa pemanfaatan teknologi modern tetap selaras dengan prinsip keberlanjutan, keamanan pangan, serta pelestarian keanekaragaman hayati di Indonesia.

## D. Hak Kekayaan Intelektual Strain Ikan

Hak kekayaan intelektual (HKI) dalam konteks strain ikan dan bioteknologi akuakultur mencakup berbagai bentuk perlindungan hukum, termasuk paten untuk invesi bioteknologi (gen, konstruk genetik, metode pemuliaan), hak pemulia tanaman/hewan (*Plant/Animal Variety Rights*) untuk strain yang dikembangkan melalui pemuliaan, dan perlindungan trade secret untuk informasi teknis yang dirahasiakan. Kompleksitas HKI dalam akuakultur diperparah oleh fakta bahwa subjek perlindungannya adalah organisme hidup yang dapat bereproduksi sendiri (van Dooren, 2007).

Kontroversi utama seputar HKI strain ikan melibatkan keseimbangan antara insentif bagi investasi penelitian dan pengembangan (yang membutuhkan perlindungan HKI yang memadai) dengan aksesibilitas teknologi bagi petambak kecil dan negara-negara berkembang. Sistem *benefit-sharing* yang adil untuk pengetahuan tradisional dan sumber daya genetik ikan dari negara-negara berkembang juga merupakan isu yang semakin mendapat perhatian dalam kerangka *Nagoya Protocol on Access and Benefit-Sharing* (2010) sebagai suplemen dari CBD (Nagoya Protocol, 2010).

## 1. Bentuk Perlindungan HKI dalam Bioteknologi Akuakultur

Hak kekayaan intelektual (HKI) dalam konteks strain ikan dan bioteknologi akuakultur mencakup berbagai instrumen hukum yang bertujuan melindungi hasil inovasi ilmiah di bidang genetika dan pemuliaan ikan. Bentuk perlindungan tersebut meliputi paten untuk invensi bioteknologi seperti gen, konstruk genetik, dan metode pemuliaan; hak pemulia varietas hewan (*Animal Variety Rights*) untuk strain ikan yang dihasilkan melalui program seleksi; serta perlindungan trade secret untuk informasi teknis yang tidak dipublikasikan, seperti formula pakan khusus atau metode produksi eksklusif.

Karakteristik unik HKI dalam akuakultur adalah objek perlindungannya berupa organisme hidup yang mampu bereproduksi secara alami. Hal ini menimbulkan kompleksitas hukum tersendiri, karena strain ikan yang telah dilepas ke lingkungan atau dibudidayakan dapat berkembang biak dan menyebar, sehingga batas kepemilikan intelektual menjadi tidak sepenuhnya absolut. Kondisi ini menjadikan pengaturan HKI dalam bioteknologi akuakultur jauh lebih kompleks dibandingkan sektor teknologi non-hayati (van Dooren, 2007). Selain itu, perkembangan teknologi seperti gene editing dan pemuliaan genomik semakin memperluas cakupan HKI, sehingga diperlukan kerangka hukum yang adaptif untuk mengakomodasi inovasi yang sangat cepat di bidang ini.

## 2. Isu Kontroversial dan *Benefit-Sharing* dalam HKI Strain Ikan

Penerapan HKI pada strain ikan memunculkan berbagai kontroversi yang berkaitan dengan keseimbangan antara insentif inovasi dan keadilan akses teknologi. Di satu sisi, perlindungan HKI diperlukan untuk memberikan insentif bagi lembaga penelitian dan industri agar

terus berinvestasi dalam pengembangan strain unggul yang memiliki produktivitas tinggi, tahan penyakit, dan efisien dalam penggunaan pakan. Tanpa perlindungan yang memadai, risiko kurangnya investasi dalam riset bioteknologi akuakultur dapat meningkat.

Namun di sisi lain, sistem HKI yang terlalu ketat dapat membatasi akses petambak kecil dan negara berkembang terhadap teknologi genetik canggih, sehingga berpotensi memperlebar kesenjangan teknologi dalam sektor perikanan global. Oleh karena itu, muncul konsep *benefit-sharing* yang menekankan pembagian manfaat secara adil dari pemanfaatan sumber daya genetik dan pengetahuan tradisional.

Kerangka *Nagoya Protocol on Access and Benefit-Sharing* (2010) menjadi instrumen penting dalam mengatur distribusi manfaat tersebut, khususnya terkait pemanfaatan sumber daya genetik ikan dari negara berkembang. Protokol ini menekankan bahwa akses terhadap sumber daya genetik harus disertai dengan mekanisme pembagian keuntungan yang adil dan transparan, baik dalam bentuk finansial maupun non-finansial (Nagoya Protocol, 2010). Dengan demikian, HKI dalam bioteknologi akuakultur tidak hanya berfungsi sebagai alat perlindungan inovasi, tetapi juga sebagai instrumen untuk memastikan keadilan global dalam pemanfaatan sumber daya genetik ikan secara berkelanjutan.

## E. *Sustainable Aquaculture Governance*

Tata kelola akuakultur yang berkelanjutan (*sustainable aquaculture governance*) merupakan kerangka kerja multi-stakeholder yang mengintegrasikan pertimbangan ekologi, ekonomi, dan sosial dalam pengambilan keputusan tentang pengembangan dan regulasi teknologi akuakultur, termasuk bioteknologi pemuliaan. Pendekatan ini mengakui bahwa teknologi terbaik sekalipun tidak akan memberikan hasil yang optimal tanpa dukungan tata kelola yang baik, partisipasi masyarakat yang bermakna, dan mekanisme akuntabilitas yang efektif (Osmundsen *et al*., 2017).

Sertifikasi akuakultur berkelanjutan seperti ASC (*Aquaculture Stewardship Council*), BAP (*Best Aquaculture Practices*), dan GlobalG.A.P. menyediakan mekanisme pasar untuk mendorong praktik budidaya yang bertanggung jawab, termasuk praktik pemuliaan yang

memperhatikan keragaman genetik dan keamanan hayati. Sertifikasi-sertifikasi ini semakin menjadi prasyarat untuk akses ke pasar ekspor premium, memberikan insentif ekonomi yang nyata bagi adopsi praktik tata kelola yang baik (Osmundsen *et al*., 2017).

Partisipasi komunitas lokal, terutama komunitas nelayan dan pembudidaya ikan skala kecil, dalam desain dan tata kelola program pemuliaan ikan merupakan dimensi yang sering diabaikan namun sangat penting. Program pemuliaan yang tidak mempertimbangkan kebutuhan dan konteks lokal cenderung tidak berkelanjutan secara sosial, bahkan jika secara teknis sangat berhasil. Pendekatan *'breeding for development'* yang mengintegrasikan pengetahuan lokal, kebutuhan pasar lokal, dan kapasitas manajemen lokal dalam desain program pemuliaan merupakan model yang semakin mendapat pengakuan internasional (Ponzoni & Nguyen, 2008).

## 1. Kerangka Tata Kelola Akuakultur Berkelanjutan

Tata kelola akuakultur berkelanjutan (*sustainable aquaculture governance*) merupakan pendekatan multi-stakeholder yang mengintegrasikan aspek ekologi, ekonomi, dan sosial dalam pengambilan keputusan terkait pengembangan dan regulasi sistem budidaya perikanan, termasuk bioteknologi dan pemuliaan ikan. Pendekatan ini menekankan bahwa keberhasilan teknologi tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan ilmiah, tetapi juga oleh kualitas tata kelola, partisipasi pemangku kepentingan, serta mekanisme akuntabilitas yang transparan dan efektif (Osmundsen *et al*., 2017).

Dalam praktiknya, tata kelola ini melibatkan berbagai aktor seperti pemerintah, industri akuakultur, lembaga penelitian, komunitas lokal, dan organisasi non-pemerintah. Sinergi antaraktor tersebut diperlukan untuk memastikan bahwa pengembangan teknologi tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas, tetapi juga menjaga keberlanjutan ekosistem perairan dan kesejahteraan sosial masyarakat pesisir. Pendekatan ini juga mendorong integrasi prinsip kehati-hatian dalam setiap tahap inovasi teknologi, termasuk dalam pengembangan strain ikan unggul, agar dampak ekologis jangka panjang dapat diminimalkan.

## 2. Sertifikasi, Partisipasi Sosial, dan Model Breeding for Development

Salah satu instrumen penting dalam tata kelola akuakultur berkelanjutan adalah sistem sertifikasi internasional seperti *Aquaculture Stewardship Council* (ASC), *Best Aquaculture Practices* (BAP), dan GlobalG.A.P. Sertifikasi ini berfungsi sebagai mekanisme berbasis pasar yang mendorong pelaku industri untuk menerapkan praktik budidaya yang bertanggung jawab, termasuk dalam aspek pemuliaan ikan, konservasi keragaman genetik, dan keamanan hayati. Dalam banyak kasus, sertifikasi tersebut menjadi syarat utama untuk mengakses pasar ekspor premium, sehingga memberikan insentif ekonomi langsung bagi penerapan praktik berkelanjutan.

Selain mekanisme pasar, dimensi sosial juga memegang peran penting dalam keberhasilan tata kelola akuakultur. Partisipasi komunitas lokal, khususnya nelayan dan pembudidaya ikan skala kecil, sering kali menjadi faktor yang menentukan keberlanjutan suatu program pemuliaan. Program yang dirancang tanpa mempertimbangkan kebutuhan lokal, kondisi sosial-ekonomi, dan kapasitas teknis masyarakat cenderung sulit diadopsi dalam jangka panjang, meskipun secara ilmiah memiliki keunggulan.

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, berkembang pendekatan *breeding for development* yang mengintegrasikan pengetahuan lokal, kebutuhan pasar domestik, serta kapasitas manajemen masyarakat dalam desain program pemuliaan ikan. Pendekatan ini menempatkan petambak sebagai bagian aktif dalam proses inovasi, bukan hanya sebagai pengguna akhir teknologi. Model ini telah mendapat pengakuan internasional karena mampu meningkatkan relevansi sosial dan keberlanjutan jangka panjang dari program pemuliaan ikan (Ponzoni & Nguyen, 2008).



# BAB XII
# MASA DEPAN PEMULIAAN IKAN BERBASIS BIOTEKNOLOGI

## A. Akuakultur Masa Depan dan Ketahanan Pangan

Akuakultur akan memainkan peran yang semakin sentral dalam sistem pangan global selama abad ke-21. Dengan sumber daya perikanan tangkap yang telah mencapai batas biologisnya di banyak wilayah dunia, akuakultur merupakan satu-satunya opsi yang dapat secara signifikan meningkatkan pasokan protein laut untuk populasi dunia yang terus bertumbuh. FAO memproyeksikan bahwa akuakultur perlu menyumbang 60% atau lebih dari total produksi pangan laut global pada tahun 2050 untuk memenuhi permintaan yang diproyeksikan sebuah tantangan yang membutuhkan akselerasi inovasi teknologi di seluruh rantai nilai produksi (FAO, 2022).

Pemuliaan ikan berbasis bioteknologi merupakan salah satu kontributor terpenting bagi peningkatan produktivitas yang diperlukan untuk mencapai proyeksi ini. Estimasi konservatif menunjukkan bahwa program pemuliaan yang diimplementasikan dengan baik dapat meningkatkan produktivitas akuakultur sebesar 10-15% per generasi, yang berarti dengan interval generasi rata-rata 2-3 tahun peningkatan produktivitas kumulatif yang sangat substansial dapat dicapai dalam jangka panjang. Negara-negara yang berinvestasi dalam program pemuliaan ikan nasional akan memiliki keunggulan kompetitif yang semakin besar di pasar protein global (Gjedrem *et al*., 2012).

Di Indonesia, potensi pengembangan akuakultur untuk ketahanan pangan sangat besar. Negara ini memiliki panjang garis pantai terpanjang kedua di dunia, ribuan sungai dan danau, serta keragaman hayati akuatik yang luar biasa sumber daya yang belum dimanfaatkan secara optimal. Program pemuliaan ikan nasional yang komprehensif dan berbasis bioteknologi modern dapat mentransformasi potensi ini menjadi kenyataan produksi, sekaligus berkontribusi pada ketahanan pangan dan peningkatan kesejahteraan masyarakat nelayan dan pembudidaya ikan (Moelyowati *et al*., 2016).

## 1. Peran Strategis Akuakultur dalam Sistem Pangan Global

Akuakultur akan menjadi salah satu pilar utama dalam sistem pangan global pada abad ke-21, terutama dalam konteks meningkatnya kebutuhan protein hewani akibat pertumbuhan populasi dunia. Di banyak wilayah, stok perikanan tangkap telah mencapai atau bahkan melampaui batas biologisnya, sehingga tidak lagi mampu menjadi sumber utama peningkatan produksi pangan laut. Dalam situasi ini, akuakultur menjadi satu-satunya sektor yang masih memiliki ruang ekspansi signifikan untuk memenuhi permintaan protein global yang terus meningkat.

FAO memproyeksikan bahwa pada tahun 2050, akuakultur perlu menyumbang lebih dari 60% total produksi pangan laut dunia agar kebutuhan konsumsi global dapat terpenuhi (FAO, 2022). Target ini menuntut transformasi besar dalam sistem produksi, mulai dari inovasi teknologi, efisiensi pakan, pengelolaan kesehatan ikan, hingga sistem distribusi berbasis data. Tanpa percepatan inovasi di seluruh rantai nilai, kesenjangan antara permintaan dan pasokan protein laut akan semakin melebar. Dalam konteks ini, akuakultur tidak hanya dipandang sebagai sektor produksi pangan, tetapi juga sebagai komponen strategis dalam ketahanan pangan global yang berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan iklim.

## 2. Pemuliaan Ikan, Produktivitas, dan Potensi Indonesia

Pemuliaan ikan berbasis bioteknologi memiliki peran kunci dalam meningkatkan produktivitas akuakultur secara berkelanjutan. Program pemuliaan yang dirancang dengan baik dapat meningkatkan produktivitas sebesar 10–15% per generasi, tergantung pada spesies dan sistem budidaya yang digunakan (Gjedrem *et al*., 2012). Dengan interval

generasi rata-rata 2–3 tahun pada banyak spesies ikan budidaya, akumulasi peningkatan produktivitas ini akan menghasilkan dampak yang sangat signifikan dalam jangka panjang. Selain peningkatan pertumbuhan, program pemuliaan modern juga berfokus pada peningkatan ketahanan penyakit, efisiensi pakan, dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berubah. Negara yang mampu mengembangkan dan mengimplementasikan program pemuliaan ikan secara sistematis akan memiliki keunggulan kompetitif yang kuat dalam pasar protein global.

Indonesia memiliki potensi yang sangat besar dalam pengembangan akuakultur sebagai pilar ketahanan pangan nasional. Dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, kekayaan sumber daya perairan darat, serta keanekaragaman hayati akuatik yang tinggi, Indonesia memiliki modal ekologis yang sangat kuat untuk menjadi pusat produksi akuakultur global. Namun, potensi ini masih belum dimanfaatkan secara optimal karena keterbatasan teknologi, infrastruktur, dan sistem pemuliaan yang terintegrasi. Pengembangan program pemuliaan ikan nasional yang berbasis bioteknologi modern, genomik, dan sistem digital berpotensi mentransformasi sektor ini secara signifikan. Selain meningkatkan produktivitas nasional, pendekatan ini juga dapat memperkuat ketahanan pangan, mengurangi ketergantungan impor protein, serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat nelayan dan pembudidaya ikan di berbagai daerah (Moelyowati *et al*., 2016).

## B. Integrasi Nanoteknologi dan Bioteknologi

Nanoteknologi manipulasi materi pada skala nanometer ($10^{-9}$ m) menawarkan sinergi yang menarik dengan bioteknologi akuakultur. Nanopartikel dan nanostruktur dengan sifat-sifat unik yang tidak dimiliki material berukuran besar dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi inovatif dalam sistem produksi ikan, dari sistem pengiriman obat dan vaksin yang lebih efisien, hingga biosensor ultra-sensitif untuk monitoring kesehatan dan lingkungan (Dusinska *et al*., 2017).

Nanobiosensor berbasis partikel emas, carbon nanotube, atau quantum dot yang difungsionalisasi dengan antibodi atau aptamer spesifik dapat mendeteksi patogen ikan, residu antibiotik, atau biomarker kesehatan dalam konsentrasi yang sangat rendah dan dalam waktu yang sangat singkat (*minutes*), jauh melampaui sensitivitas metode diagnostik

konvensional. Integrasi nanobiosensor ke dalam sistem monitoring akuakultur pintar akan memungkinkan deteksi dini penyakit dan intervensi yang sangat tepat waktu (Dusinska *et al*., 2017).

Penggunaan nanopartikel sebagai vehicle pengiriman DNA (*gene delivery*) merupakan area penelitian yang sedang aktif dikembangkan sebagai alternatif dari metode transfeksi konvensional dalam gene editing. *Lipid nanoparticles* (LNP) yang telah terbukti efektif sebagai sistem pengiriman mRNA dalam vaksin COVID-19 membuka peluang untuk pengiriman komponen CRISPR (Cas9 mRNA + sgRNA) ke dalam zigot ikan secara non-viral, yang berpotensi lebih aman dan lebih mudah diregulasi dibandingkan metode viral atau elektroporasi (Anzalone *et al*., 2020).

## 1. Nanoteknologi dalam Sistem Akuakultur Modern

Nanoteknologi merupakan cabang ilmu yang memanfaatkan material berukuran sangat kecil, umumnya pada skala nanometer, untuk menghasilkan sifat fisik, kimia, dan biologis yang berbeda dari material dalam ukuran makro. Dalam sistem akuakultur modern, nanoteknologi mulai banyak diterapkan karena kemampuannya meningkatkan efisiensi produksi, memperbaiki kualitas lingkungan budidaya, serta mendukung kesehatan ikan melalui pendekatan yang lebih presisi. Material nano memiliki luas permukaan yang sangat besar dibandingkan volumenya, sehingga lebih reaktif dan efektif dalam berbagai aplikasi, termasuk penyerapan, penghantaran zat aktif, serta interaksi biologis pada tingkat seluler.

Salah satu aplikasi utama nanoteknologi dalam akuakultur adalah dalam pengelolaan kualitas air. Nanomaterial seperti nano-oksida logam dapat digunakan untuk membantu proses filtrasi, adsorpsi senyawa berbahaya, serta pengendalian patogen di lingkungan budidaya. Teknologi ini memungkinkan penurunan kadar amonia, nitrit, logam berat, dan polutan lainnya secara lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Selain itu, nanoteknologi juga dapat digunakan dalam sistem biofilter untuk meningkatkan stabilitas ekosistem mikro di dalam kolam atau sistem resirkulasi akuakultur, sehingga menciptakan lingkungan yang lebih optimal bagi pertumbuhan ikan.

Dalam bidang nutrisi, nanoteknologi juga berperan penting melalui pengembangan pakan berbasis nanoenkapsulasi. Sistem ini memungkinkan nutrien, vitamin, mineral, atau senyawa bioaktif dikemas

dalam partikel nano sehingga lebih stabil, mudah diserap, dan memiliki efisiensi pemanfaatan yang lebih tinggi di dalam tubuh ikan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan pertumbuhan dan efisiensi pakan, tetapi juga dapat digunakan untuk menghantarkan imunostimulan atau obat secara lebih terarah, sehingga mendukung kesehatan ikan secara lebih efektif dengan dosis yang lebih rendah dan risiko pencemaran lingkungan yang minimal.

Selain itu, nanoteknologi juga mulai digunakan dalam sistem deteksi penyakit dan monitoring kesehatan ikan melalui biosensor berbasis nanomaterial. Sensor ini mampu mendeteksi perubahan biomarker, patogen, atau kondisi lingkungan dalam skala sangat kecil dengan sensitivitas tinggi. Integrasi teknologi ini dalam sistem akuakultur memungkinkan deteksi dini penyakit sebelum menyebar secara luas, sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan lebih cepat dan tepat. Secara keseluruhan, nanoteknologi memberikan kontribusi besar dalam mewujudkan sistem akuakultur yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan melalui peningkatan kualitas lingkungan, nutrisi, serta kesehatan ikan secara terintegrasi.

## 2. Nanobiosensor dan *Gene Delivery* dalam Bioteknologi Akuakultur

Salah satu inovasi paling signifikan dalam integrasi nanoteknologi dan bioteknologi adalah pengembangan nanobiosensor untuk sistem monitoring akuakultur. Nanobiosensor berbasis partikel emas, *carbon nanotube*, atau *quantum dot* yang difungsionalisasi dengan antibodi atau aptamer spesifik mampu mendeteksi patogen ikan, residu antibiotik, serta biomarker kesehatan dalam konsentrasi yang sangat rendah. Sensitivitasnya jauh melampaui metode diagnostik konvensional, dengan waktu deteksi yang hanya membutuhkan hitungan menit. Teknologi ini memungkinkan sistem akuakultur pintar melakukan deteksi dini terhadap penyakit atau gangguan lingkungan secara real-time. Dengan demikian, intervensi dapat dilakukan lebih cepat sebelum terjadi kerugian besar dalam sistem produksi. Integrasi nanobiosensor ke dalam jaringan *Internet of Things* (IoT) juga memperkuat konsep smart aquaculture yang berbasis data kontinu dan presisi tinggi (Dusinska *et al*., 2017).

Selain aplikasi diagnostik, nanoteknologi juga memainkan peran penting dalam rekayasa genetika melalui sistem *gene delivery*.

Nanopartikel digunakan sebagai kendaraan untuk membawa materi genetik seperti DNA, mRNA, atau komponen CRISPR (Cas9 dan sgRNA) ke dalam sel target, termasuk zigot ikan. Pendekatan ini menjadi alternatif non-viral yang lebih aman dibandingkan metode transfeksi konvensional seperti virus atau elektroporasi. Penggunaan *lipid nanoparticles* (LNP), yang telah terbukti efektif dalam teknologi vaksin mRNA, membuka peluang baru dalam aplikasi gene editing pada ikan budidaya. Sistem ini berpotensi meningkatkan efisiensi dan keamanan proses rekayasa genetik, sekaligus memberikan jalur regulasi yang lebih mudah diterima dalam pengembangan bioteknologi akuakultur modern (Anzalone *et al*., 2020).

## C. *Blue Biotechnology Economy*

*Blue biotechnology economy* atau ekonomi bioteknologi biru merupakan konsep yang mengacu pada pemanfaatan sumber daya biologis kelautan dan perairan untuk menciptakan nilai ekonomi melalui aplikasi bioteknologi. Dalam konteks yang lebih luas dari sekadar akuakultur, bioteknologi biru mencakup: pengembangan obat dan nutraseutikal dari organisme laut, ekstraksi enzim dan biomaterial dari mikroorganisme akuatik, bioprospeksi keragaman genetik laut, serta pengembangan biofuel dari alga (European Commission, 2017).

Nilai pasar global bioteknologi biru diestimasi akan mencapai USD 6,4 miliar pada tahun 2025, tumbuh dengan CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) sekitar 6,5% per tahun. Indonesia, dengan posisinya sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dan kekayaan keanekaragaman hayati lautnya, memiliki potensi yang sangat besar untuk menjadi pemain utama dalam ekonomi bioteknologi biru global jika investasi dalam penelitian dan pengembangan, infrastruktur, dan sumber daya manusia dapat ditingkatkan secara signifikan (*European Commission*, 2017).

Pemuliaan ikan berbasis bioteknologi merupakan komponen inti dari strategi pengembangan ekonomi bioteknologi biru yang komprehensif. Strain-strain ikan unggul yang dikembangkan melalui program pemuliaan nasional yang kuat tidak hanya meningkatkan produktivitas akuakultur domestik, tetapi juga dapat menjadi komoditas ekspor bernilai tinggi dalam bentuk benih, induk, atau strain bersertifikat

yang dipasarkan ke negara-negara lain di kawasan Asia Tenggara dan Asia Selatan (Gjedrem *et al*., 2012).

## 1. Konsep dan Ruang Lingkup Ekonomi Bioteknologi Biru

Ekonomi bioteknologi biru merupakan konsep yang menggabungkan pemanfaatan sumber daya hayati perairan dengan inovasi bioteknologi untuk menghasilkan nilai ekonomi, sosial, dan lingkungan secara berkelanjutan. Konsep ini berfokus pada optimalisasi potensi organisme akuatik seperti ikan, moluska, alga, mikroorganisme, serta ekosistem laut dan perairan darat melalui pendekatan ilmiah berbasis bioteknologi modern. Dalam kerangka ini, bioteknologi tidak hanya dipandang sebagai alat produksi, tetapi juga sebagai pendorong transformasi sistem ekonomi perikanan menuju model yang lebih efisien, inovatif, dan ramah lingkungan.

Ruang lingkup ekonomi bioteknologi biru sangat luas, mencakup berbagai sektor mulai dari akuakultur, perikanan tangkap berbasis konservasi, pengolahan hasil perikanan, hingga pengembangan produk bernilai tambah tinggi seperti enzim, bioaktif, farmasi, dan bahan pangan fungsional. Dalam sektor akuakultur, penerapan bioteknologi meliputi pemuliaan ikan berbasis genom, rekayasa genetika, diagnostik molekuler, serta sistem budidaya presisi yang meningkatkan produktivitas dan efisiensi produksi. Sementara itu, dalam sektor hilir, bioteknologi digunakan untuk mengembangkan produk turunan yang memiliki nilai ekonomi lebih tinggi dibandingkan produk primer.

Selain aspek produksi, ekonomi bioteknologi biru juga mencakup pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan dan konservasi keanekaragaman hayati. Hal ini melibatkan pemanfaatan teknologi untuk memantau ekosistem perairan, mencegah overeksploitasi, serta menjaga keseimbangan ekologis. Pendekatan ini menekankan pentingnya keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dan pelestarian lingkungan, sehingga pemanfaatan sumber daya perairan tidak mengorbankan keberlanjutan ekosistem di masa depan.

Ekonomi bioteknologi biru merupakan paradigma pembangunan berbasis inovasi yang mengintegrasikan ilmu biologi, teknologi, dan ekonomi dalam pengelolaan sumber daya perairan. Dengan ruang lingkup yang mencakup produksi, inovasi, dan konservasi, konsep ini menjadi dasar penting dalam pengembangan industri perikanan modern

yang tidak hanya berorientasi pada keuntungan ekonomi, tetapi juga pada keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan masyarakat.

### 2. Potensi Ekonomi Global dan Peran Pemuliaan Ikan

Nilai pasar global bioteknologi biru diproyeksikan mencapai sekitar USD 6,4 miliar pada tahun 2025 dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk (*Compound Annual Growth Rate/CAGR*) sekitar 6,5%. Pertumbuhan ini menunjukkan meningkatnya permintaan global terhadap produk berbasis bioteknologi laut yang bernilai tinggi dan berkelanjutan. Indonesia, sebagai negara kepulauan terbesar di dunia dengan kekayaan keanekaragaman hayati laut yang sangat tinggi, memiliki posisi strategis untuk menjadi pemain utama dalam ekonomi bioteknologi biru global. Namun, potensi ini hanya dapat direalisasikan melalui peningkatan investasi dalam riset dan pengembangan, penguatan infrastruktur bioteknologi, serta pengembangan sumber daya manusia yang kompeten di bidang ini.

Dalam konteks ini, pemuliaan ikan berbasis bioteknologi menjadi komponen inti dari strategi pengembangan ekonomi bioteknologi biru. Program pemuliaan yang terstruktur dan berbasis ilmiah dapat menghasilkan strain ikan unggul dengan produktivitas tinggi, ketahanan penyakit yang lebih baik, dan efisiensi pakan yang optimal. Strain unggul ini tidak hanya meningkatkan produksi dalam negeri, tetapi juga memiliki potensi sebagai komoditas ekspor bernilai tinggi dalam bentuk benih, induk, atau strain bersertifikat ke berbagai negara, khususnya di kawasan Asia Tenggara dan Asia Selatan (Gjedrem *et al*., 2012). Dengan demikian, ekonomi bioteknologi biru tidak hanya menjadi peluang ekonomi, tetapi juga strategi pembangunan berkelanjutan yang mengintegrasikan inovasi teknologi, pemanfaatan sumber daya alam, dan peningkatan daya saing global sektor perikanan.

## D. Tantangan SDGs dalam Akuakultur

*Sustainable Development Goals* (SDGs) yang diadopsi oleh PBB pada tahun 2015 sebagai kerangka pembangunan global hingga 2030 memiliki relevansi yang sangat langsung dengan pengembangan akuakultur berbasis bioteknologi. Akuakultur berkelanjutan berkontribusi secara potensial terhadap setidaknya tujuh dari 17 SDG: SDG 1 (*No Poverty*), SDG 2 (*Zero Hunger*), SDG 3 (*Good Health and*

*Well-being*), SDG 8 (*Decent Work and Economic Growth*), SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*), SDG 14 (*Life Below Water*), dan SDG 17 (*Partnerships for the Goals*) (UN, 2015; FAO, 2022).

Namun, mencapai kontribusi positif terhadap SDGs bukanlah hal yang otomatis diperlukan desain program pemuliaan dan akuakultur yang secara eksplisit mempertimbangkan dimensi sosial, lingkungan, dan ekonomi secara bersamaan. Program pemuliaan yang hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas tanpa memperhatikan dampak sosial (termasukdampak pada nelayan tradisional) atau dampak lingkungan (termasuk risiko genetik terhadap populasi liar) dapat secara paradoks memberikan kontribusi negatif terhadap beberapa SDG meskipun berhasil dalam dimensi produktivitas (Osmundsen *et al*., 2017).

Tabel 14. Keterkaitan Antara SDGs dan Kontribusi Potensial Akuakultur Berbasis Bioteknologi

| **SDG** | **Target Relevan** | **Kontribusi Akuakultur Bioteknologi** |
|---|---|---|
| SDG 2: *Zero Hunger* | 2.3, 2.4: Produktivitas & keberlanjutan pertanian | Strain unggul → produksi ikan naik → akses protein meningkat |
| SDG 3: *Good Health* | 3.1: Nutrisi dan kesehatan | Ikan omega-3 tinggi → gizi masyarakat meningkat |
| SDG 8: *Decent Work* | 8.3: Pekerjaan layak | Industri akuakultur berkembang → lapangan kerja meningkat |
| SDG 12: *Responsible Consumption* | 12.2: Sumber daya berkelanjutan | FCR efisien → limbah nutrisi berkurang |
| SDG 14: *Life Below Water* | 14.2: Ekosistem laut sehat | Mengurangi tekanan pada stok ikan liar |

| SDG | Target Relevan | Kontribusi Akuakultur Bioteknologi |
|---|---|---|
| SDG 17: *Partnerships* | 17.6: Transfer teknologi | Kerjasama riset internasional untuk akuakultur berkembang |

Pada SDG 2: *Zero Hunger*, khususnya target 2.3 dan 2.4, akuakultur berbasis bioteknologi berperan dalam meningkatkan produktivitas pangan melalui pengembangan strain ikan unggul yang memiliki laju pertumbuhan tinggi, efisiensi pakan lebih baik, serta tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi. Peningkatan produksi ini secara langsung memperluas akses masyarakat terhadap sumber protein hewani, terutama di wilayah dengan keterbatasan produksi perikanan tangkap.

Pada SDG 3: *Good Health and Well-being*, khususnya target 3.1 yang berkaitan dengan peningkatan status gizi dan kesehatan masyarakat, akuakultur berkontribusi melalui produksi ikan dengan kandungan nutrisi yang lebih baik, seperti peningkatan asam lemak omega-3. Rekayasa nutrigenomik dan seleksi genetik memungkinkan peningkatan kualitas gizi ikan yang berdampak pada perbaikan kesehatan masyarakat, terutama dalam pencegahan malnutrisi.

Pada SDG 8: *Decent Work and Economic Growth*, khususnya target 8.3, pengembangan industri akuakultur berbasis bioteknologi mendorong penciptaan lapangan kerja baru di berbagai sektor, mulai dari hatchery, pembesaran, industri pakan, hingga bioteknologi perikanan. Peningkatan produktivitas dan efisiensi juga memperkuat daya saing ekonomi sektor perikanan budidaya.

Pada SDG 12: *Responsible Consumption and Production*, khususnya target 12.2, penerapan strain ikan dengan *Feed Conversion Ratio* (FCR) yang lebih efisien berkontribusi dalam pengurangan penggunaan sumber daya pakan serta minimisasi limbah nitrogen dan fosfor ke lingkungan. Hal ini mendukung sistem produksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan melalui optimalisasi input-output dalam sistem budidaya.

Pada SDG 14: *Life Below Water*, khususnya target 14.2, akuakultur berperan dalam mengurangi tekanan terhadap stok ikan liar di ekosistem perairan alami. Dengan meningkatnya produksi ikan

budidaya melalui teknologi bioteknologi, ketergantungan terhadap perikanan tangkap dapat ditekan, sehingga memberikan peluang pemulihan populasi ikan di alam. Namun, hal ini tetap perlu diimbangi dengan pengelolaan risiko seperti escapee dan introgression genetik ke populasi liar.

Pada SDG 17: *Partnerships for the Goals*, khususnya target 17.6, akuakultur berbasis bioteknologi mendorong kolaborasi internasional dalam bidang riset, transfer teknologi, dan pengembangan kapasitas. Kerja sama antara institusi penelitian, industri, dan pemerintah menjadi faktor kunci dalam mempercepat adopsi teknologi genomik, AI, dan bioteknologi reproduksi di negara berkembang.

Meskipun setiap SDG tersebut memiliki potensi kontribusi positif, tabel ini juga menunjukkan bahwa hubungan antara akuakultur bioteknologi dan SDGs bersifat kompleks dan multidimensional. Implementasi teknologi yang tidak mempertimbangkan keseimbangan sosial dan ekologis dapat menimbulkan *trade-off*, seperti ketimpangan akses teknologi, dampak terhadap nelayan kecil, atau risiko ekologis terhadap biodiversitas perairan. Oleh karena itu, integrasi prinsip keberlanjutan dalam desain program pemuliaan dan kebijakan akuakultur menjadi faktor penentu agar kontribusi terhadap SDGs dapat tercapai secara seimbang dan berkelanjutan.

## 1. Keterkaitan Akuakultur Bioteknologi dengan SDGs

Akuakultur berbasis bioteknologi memiliki keterkaitan yang sangat erat dengan agenda *Sustainable Development Goals* karena berperan dalam menyediakan pangan yang berkelanjutan, meningkatkan efisiensi produksi, serta menjaga keseimbangan ekosistem perairan. Melalui penerapan teknologi seperti pemuliaan berbasis genom, diagnostik molekuler, rekayasa genetika, dan sistem budidaya presisi, akuakultur modern mampu meningkatkan produktivitas ikan dengan penggunaan sumber daya yang lebih efisien. Hal ini secara langsung mendukung tujuan *zero hunger* melalui peningkatan ketersediaan protein hewani yang berkualitas dan terjangkau bagi masyarakat.

Selain aspek ketahanan pangan, akuakultur bioteknologi juga berkontribusi pada tujuan *good health and well-being* melalui peningkatan keamanan pangan. Teknologi seperti *DNA barcoding*, sistem deteksi patogen berbasis molekuler, serta pengendalian penyakit yang lebih presisi membantu memastikan bahwa produk perikanan yang

dihasilkan bebas dari kontaminasi dan aman untuk dikonsumsi. Di sisi lain, inovasi dalam pakan dan kesehatan ikan juga mengurangi penggunaan antibiotik secara berlebihan, sehingga turut mendukung pengurangan risiko resistensi antimikroba yang menjadi isu kesehatan global.

Dalam konteks keberlanjutan lingkungan, akuakultur berbasis bioteknologi mendukung tujuan *life below water* melalui pengelolaan sumber daya perairan yang lebih bertanggung jawab. Teknologi pemantauan kualitas air, *biosafety*, serta sistem budidaya tertutup atau resirkulasi membantu mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem alami. Selain itu, pendekatan berbasis genetika juga memungkinkan pengembangan strain ikan yang lebih efisien dalam penggunaan pakan dan lebih tahan terhadap penyakit, sehingga mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam dan lingkungan perairan.

Akuakultur bioteknologi juga berkaitan dengan tujuan *decent work and economic growth* serta *industry, innovation and infrastructure* karena mendorong terciptanya industri perikanan yang lebih modern, inovatif, dan berbasis teknologi tinggi. Pengembangan sektor ini membuka peluang kerja baru di bidang bioteknologi, bioinformatika, dan manajemen data akuakultur, sekaligus meningkatkan daya saing ekonomi perikanan di tingkat global. Dengan demikian, integrasi akuakultur dan bioteknologi tidak hanya memberikan manfaat ekologis dan biologis, tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap pembangunan ekonomi yang inklusif dan berkelanjutan sesuai dengan prinsip *Sustainable Development Goals*.

Namun, kontribusi tersebut tidak terjadi secara otomatis. Diperlukan desain sistem akuakultur dan program pemuliaan ikan yang secara eksplisit mengintegrasikan dimensi sosial, ekonomi, dan lingkungan secara seimbang. Pendekatan yang hanya berfokus pada peningkatan produktivitas tanpa mempertimbangkan dampak ekologis maupun sosial dapat menimbulkan trade-off antar-SDGs, bahkan berpotensi memberikan dampak negatif pada tujuan tertentu seperti keberlanjutan ekosistem laut atau kesejahteraan nelayan kecil (Osmundsen *et al*., 2017). Dengan demikian, SDGs dalam akuakultur tidak hanya berfungsi sebagai target, tetapi juga sebagai kerangka evaluasi untuk memastikan bahwa inovasi bioteknologi memberikan manfaat yang adil, berkelanjutan, dan inklusif.

## 2. Kontribusi dan Tantangan Implementasi SDGs dalam Akuakultur

Pada SDG 2 (*Zero Hunger*), akuakultur berbasis bioteknologi berkontribusi melalui peningkatan produktivitas pangan laut, terutama melalui pengembangan strain ikan unggul dengan pertumbuhan cepat, efisiensi pakan tinggi, dan tingkat kelangsungan hidup yang lebih baik. Hal ini secara langsung meningkatkan ketersediaan protein hewani dan memperkuat ketahanan pangan, khususnya di wilayah dengan keterbatasan produksi perikanan tangkap. Pada SDG 3 (*Good Health and Well-being*), peningkatan kualitas nutrisi ikan melalui pendekatan nutrigenomik dan seleksi genetik memungkinkan produksi ikan dengan kandungan gizi lebih tinggi, seperti omega-3, yang berperan penting dalam kesehatan manusia. Hal ini berkontribusi pada perbaikan status gizi masyarakat dan pencegahan penyakit terkait malnutrisi.

Pada SDG 8 (*Decent Work and Economic Growth*), pengembangan industri akuakultur berbasis bioteknologi menciptakan lapangan kerja baru di berbagai sektor, mulai dari pembenihan, pembesaran, industri pakan, hingga riset bioteknologi. Peningkatan efisiensi produksi juga memperkuat daya saing ekonomi sektor perikanan budidaya. Pada SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*), penggunaan strain ikan dengan *Feed Conversion Ratio* (FCR) yang lebih efisien berkontribusi dalam pengurangan penggunaan pakan dan limbah nutrien ke lingkungan. Hal ini mendukung sistem produksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan melalui optimalisasi input-output dalam sistem budidaya.

Pada SDG 14 (*Life Below Water*), peningkatan produksi akuakultur berpotensi mengurangi tekanan terhadap stok ikan liar di ekosistem perairan alami. Namun, kontribusi positif ini harus diimbangi dengan mitigasi risiko ekologis seperti *escapee* ikan budidaya dan potensi introgression genetik ke populasi liar. Pada SDG 17 (*Partnerships for the Goals*), akuakultur berbasis bioteknologi mendorong kolaborasi internasional dalam riset, transfer teknologi, dan penguatan kapasitas. Sinergi antara institusi penelitian, industri, dan pemerintah menjadi kunci percepatan adopsi teknologi modern seperti genomik, AI, dan sistem digital dalam akuakultur.

Meskipun demikian, implementasi SDGs dalam akuakultur menghadapi tantangan kompleks berupa trade-off antar tujuan. Peningkatan produktivitas dapat berdampak pada ketimpangan akses

teknologi, tekanan terhadap nelayan kecil, atau risiko ekologis terhadap biodiversitas perairan. Oleh karena itu, keberhasilan kontribusi akuakultur terhadap SDGs sangat bergantung pada integrasi prinsip keberlanjutan dalam kebijakan, teknologi, dan tata kelola sektor perikanan secara menyeluruh.

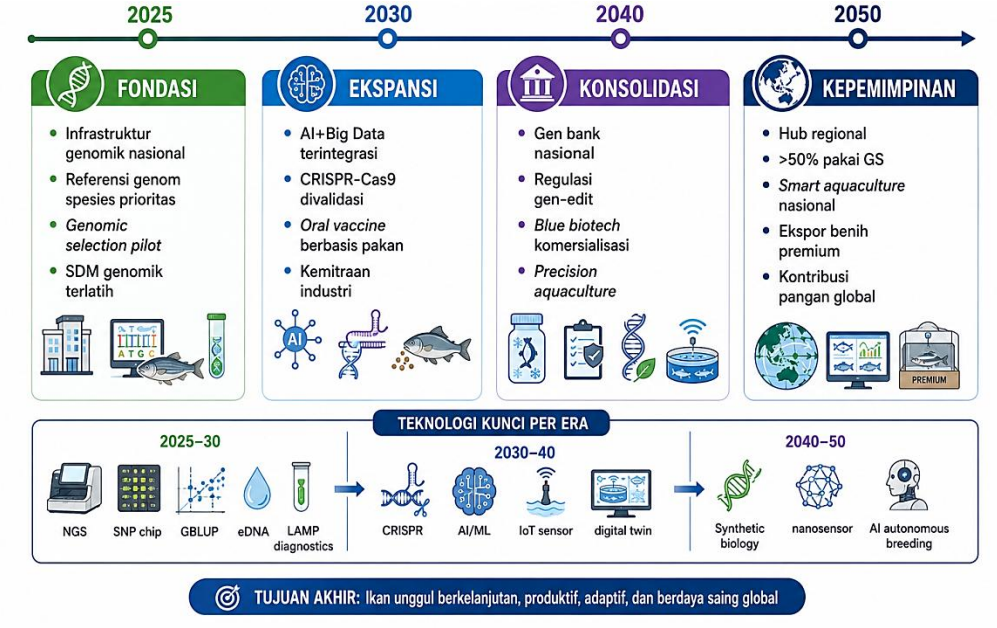
## E. *Roadmap* Pemuliaan Ikan Generasi Baru

*Roadmap* pemuliaan ikan generasi baru untuk Indonesia dan kawasan Asia Tenggara harus dibangun di atas fondasi yang kokoh sambil bervisi jauh ke depan. Dalam jangka pendek (2025-2030), prioritas utama meliputi: (1) pembangunan infrastruktur genomik nasional (platform NGS, database genomik, fasilitas analisis bioinformatika), (2) pengembangan referensi genom lengkap untuk spesies akuakultur prioritas nasional, (3) implementasi genomic selection pada program pemuliaan ikan komersial terkemuka, dan (4) pengembangan sumber daya manusia yang terampil dalam genomik dan bioinformatika akuakultur.

Dalam jangka menengah (2030-2040), fokus beralih pada: (1) integrasi AI dan big data ke dalam sistem manajemen program pemuliaan, (2) pengembangan dan validasi aplikasi CRISPR-Cas9 untuk strain ikan budidaya prioritas, (3) pembangunan bank gen nasional yang komprehensif untuk konservasi keragaman genetik spesies ikan, (4) pengembangan regulasi nasional yang inovatif dan berbasis sains untuk produk ikan gene-edited, dan (5) komersialisasi produk vaksin oral berbasis pakan yang dikembangkan melalui bioteknologi.

Dalam jangka panjang (2040-2050), visi yang diharapkan adalah: (1) Indonesia menjadi hub regional untuk bioteknologi akuakultur di Asia Tenggara, (2) lebih dari 50% produksi akuakultur nasional menggunakan strain yang dikembangkan melalui program pemuliaan berbasis genomik presisi, (3) sistem akuakultur presisi yang terintegrasi AI dan IoT menjadi standar industri, dan (4) kontribusi akuakultur Indonesia terhadap ketahanan pangan regional melalui ekspor benih, induk, dan produk bernilai tambah tinggi menjadi signifikan dalam dimensi blue economy nasional.

Gambar 8. *Roadmap* Pengembangan Pemuliaan Ikan Berbasis Bioteknologi di Indonesia 2025–2050




*Roadmap* tersebut menunjukkan bahwa pengembangan pemuliaan ikan di Indonesia tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi jangka pendek, tetapi juga pada transformasi struktural menuju sistem akuakultur presisi yang berbasis data, genetika, dan kecerdasan buatan. Pendekatan bertahap ini menegaskan pentingnya integrasi antara inovasi teknologi, kebijakan publik, dan kesiapan sumber daya manusia dalam mewujudkan sistem akuakultur yang berdaya saing global dan berkelanjutan.

Pencapaian visi ambisius ini membutuhkan kolaborasi yang erat dan terstruktur antara pemerintah, lembaga penelitian, perguruan tinggi, industri, dan komunitas petambak. Investasi dalam sumber daya manusia melalui pendidikan pascasarjana yang relevan, pertukaran peneliti internasional, dan pelatihan teknis yang berkelanjutan merupakan prasyarat yang tidak dapat ditawar. Tidak ada teknologi secanggih apapun yang dapat memberikan hasil optimal tanpa sumber daya manusia yang kompeten, berdedikasi, dan berjiwa inovatif untuk mengimplementasikan, mengadaptasi, dan mengembangkannya lebih lanjut sesuai dengan konteks lokal yang unik di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara.

**1. Tahap Fondasi (2025–2030)**

*Roadmap* pemuliaan ikan generasi baru di Indonesia dan kawasan Asia Tenggara dimulai pada fase fondasi yang berfokus pada pembangunan kapasitas dasar ilmu dan teknologi genomik. Prioritas utama pada periode ini adalah penguatan infrastruktur genomik nasional, termasuk pengadaan platform *Next Generation Sequencing* (NGS), pembangunan database genomik ikan, serta pengembangan pusat analisis bioinformatika yang terintegrasi. Infrastruktur ini menjadi tulang punggung bagi seluruh aktivitas pemuliaan berbasis data di masa depan.

Selain infrastruktur, tahap ini juga mencakup penyusunan referensi genom lengkap untuk spesies akuakultur prioritas nasional seperti nila, lele, bandeng, dan udang vaname. Referensi genom ini menjadi dasar penting dalam pengembangan seleksi genetik yang lebih presisi. Pada saat yang sama, implementasi *genomic selection* mulai dilakukan pada skala pilot di beberapa unit pemuliaan ikan komersial, sehingga seleksi tidak lagi hanya berbasis fenotipik, tetapi mulai memanfaatkan data molekuler seperti SNP dan marker genetik. Pengembangan sumber daya manusia juga menjadi komponen kunci pada fase ini, khususnya dalam bidang genomik, statistik genetika, dan bioinformatika akuakultur, untuk memastikan kesiapan tenaga ahli dalam mendukung transformasi teknologi.

**2. Tahap Ekspansi dan Konsolidasi Teknologi (2030–2050)**

Pada fase jangka menengah (2030–2040), fokus roadmap bergeser ke tahap ekspansi teknologi melalui integrasi sistem digital dan bioteknologi tingkat lanjut. Salah satu arah utama adalah penerapan kecerdasan buatan (AI) dan *big data analytics* untuk mengelola data genomik dan performa produksi secara lebih efisien dan adaptif. Pada periode ini, sistem pemuliaan ikan mulai memanfaatkan integrasi data skala besar untuk meningkatkan akurasi seleksi dan mempercepat siklus pemuliaan. Selain itu, teknologi *CRISPR-Cas9* mulai dikembangkan dan divalidasi untuk aplikasi pada ikan budidaya unggulan, meskipun tetap berada dalam kerangka regulasi yang ketat. Pengembangan *gene editing* ini diarahkan untuk peningkatan ketahanan penyakit, efisiensi pakan, dan adaptasi lingkungan. Pada saat yang sama, pembangunan bank gen nasional menjadi prioritas untuk menjaga dan mengamankan keragaman genetik sumber daya ikan Indonesia sebagai aset biologis jangka panjang.

Inovasi lain yang mulai memasuki tahap komersialisasi adalah pengembangan vaksin oral berbasis pakan yang memanfaatkan bioteknologi modern untuk meningkatkan ketahanan penyakit ikan secara lebih efisien dan praktis. Regulasi nasional juga mulai beradaptasi untuk mengakomodasi perkembangan teknologi *gene editing* berbasis pendekatan ilmiah yang lebih maju. Memasuki fase jangka panjang (2040–2050), sistem akuakultur Indonesia ditargetkan mencapai tingkat kematangan teknologi yang tinggi dan terintegrasi penuh. Indonesia diproyeksikan menjadi pusat (*hub*) bioteknologi akuakultur di Asia Tenggara dengan kapasitas inovasi yang kompetitif di tingkat global. Lebih dari 50% produksi akuakultur nasional diharapkan telah menggunakan strain hasil *genomic selection* dan pemuliaan presisi.

Pada fase ini, sistem *smart aquaculture* berbasis AI, Internet of Things (IoT), dan digital monitoring menjadi standar industri. Indonesia juga diproyeksikan memiliki peran penting dalam ekonomi biru (*blue economy*) melalui ekspor benih unggul, induk berkualitas, serta produk akuakultur bernilai tambah tinggi ke pasar internasional. Evolusi teknologi yang terjadi mencakup transisi dari NGS dan SNP chip pada fase awal, menuju CRISPR, AI/ML, IoT, dan *digital twin* pada fase menengah, hingga sistem *synthetic biology*, nanosensor, dan AI otonom pada fase akhir. Keberhasilan roadmap ini sangat bergantung pada kolaborasi antara pemerintah, lembaga penelitian, perguruan tinggi, industri, dan komunitas pembudidaya ikan, serta investasi berkelanjutan dalam pengembangan sumber daya manusia yang kompeten dan adaptif terhadap perkembangan teknologi.



# DAFTAR PUSTAKA


Alberts, B., Heald, R., Johnson, A., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2022). Molecular Biology of the Cell (7th ed.). W. W. Norton & Company.

Allendorf, F. W., Luikart, G., & Aitken, S. N. (2013). Conservation and the Genetics of Populations (2nd ed.). Wiley-Blackwell.

Anzalone, A. V., Koblan, L. W., & Liu, D. R. (2020). Genome editing with CRISPR–Cas nucleases, base editors, transposases and prime editors. Nature Biotechnology, 38, 824–844.

Astatkie, T., Ayers, G. S., & Moreira, M. A. (2004). Estimation and prediction of heterosis and inbreeding depression in hybrid fish. Aquaculture, 232(1-4), 111–122.

Baroiller, J. F., & D'Cotta, H. (2016). The reversible sex of gonochoristic fish: Insights and consequences. Sexual Development, 10(5-6), 242–266.

Bart, A. N. (2009). Cryopreservation of fish gametes: Current state and future perspectives. In R. J. Bhatt & A. Kumar (Eds.), Advances in Aquaculture. Daya Publishing House.

Bartley, D. M., Rana, K., & Immink, A. J. (2001). The use of inter-specific hybrids in aquaculture and fisheries. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 10(3), 325–337.

Beardmore, J. A., Mair, G. C., & Lewis, R. I. (2001). Monosex male production in finfish as exemplified by tilapia: applications, problems, and prospects. Aquaculture, 197(1-4), 283–301.

Bellot, P., de los Campos, G., & Pérez-Enciso, M. (2018). Can deep learning improve genomic prediction of complex human traits? Genetics, 210(3), 809–819.

Bernatchez, L., & Landry, C. (2003). MHC studies in nonmodel vertebrates: what have we learned about natural selection in 15 years? Journal of Evolutionary Biology, 16(3), 363–377.

Billard, R., & Zhang, T. (2001). Techniques of genetic resource banking in fish. In P. F. Watson & W. V. Holt (Eds.), Cryobanking the Genetic Resource. Taylor & Francis.

Birchler, J. A., Yao, H., Chudalayandi, S., Vaiman, D., & Veitia, R. A. (2010). Heterosis. The Plant Cell, 22(7), 2105–2112.

Bowen, B. W., Gaither, M. R., DiBattista, J. D., Iacchei, M., Andrews, K. R., Grant, W. S., Toonen, R. J., & Briggs, J. C. (2020). Comparative phylogeography of the ocean planet. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(29), 7962–7969.

Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., McNevin, A. A., Tacon, A. G. J., Teletchea, F., Tomasso, J. R., Tucker, C. S., & Valenti, W. C. (2015). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. Journal of the World Aquaculture Society, 51(3), 578–633.

Cabrita, E., Robles, V., & Herráez, M. P. (2010). Methods in Reproductive Aquaculture: Marine and Freshwater Species. CRC Press.

CBD (Convention on Biological Diversity). (2000). Cartagena Protocol on Biosafety. Secretariat of the Convention on Biological Diversity.

Charlesworth, D., & Willis, J. H. (2009). The genetics of inbreeding depression. Nature Reviews Genetics, 10(11), 783–796.

Chen, Z. J. (2013). Genomic and epigenetic insights into the molecular bases of heterosis. Nature Reviews Genetics, 14(7), 471–482.

CJEU (Court of Justice of the European Union). (2018). Judgment in Case C-528/16 – Confédération paysanne and Others. European Court of Justice.

Claireaux, G., & Chabot, D. (2016). Responses by fishes to environmental hypoxia: Integration through Fry's concept of aerobic metabolic scope. Journal of Fish Biology, 88(1), 232–251.

Daetwyler, H. D., Calus, M. P. L., Pong-Wong, R., de los Campos, G., & Hickey, J. M. (2013). Genomic prediction in animals and plants: Simulation of data, validation, reporting, and benchmarking. Genetics, 193(2), 347–365.

Davey, J. W., Hohenlohe, P. A., Etter, P. D., Boone, J. Q., Catchen, J. M., & Blaxter, M. L. (2011). Genome-wide genetic marker

discovery and genotyping using next-generation sequencing. Nature Reviews Genetics, 12(7), 499–510.

Dekkers, J. C. M. (2004). Commercial application of marker- and gene-assisted selection in livestock: Strategies and lessons. Journal of Animal Science, 82(E-Suppl), E313–E328.

Devlin, R. H., Sundström, L. F., & Muir, W. M. (2004). Interface of biotechnology and ecology for environmental risk assessments of transgenic fish. Trends in Biotechnology, 22(2), 89–97.

Dong, Z., Dong, X., Niu, C., Zheng, M., Lv, J., Liu, X., Sun, C., & Zhang, Y. (2019). CRISPR/Cas9-mediated disruption of the teleost-specific gene cyp11c1 causes male-to-female sex reversal in zebrafish. Molecular and Cellular Endocrinology, 492, 110440.

Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2012). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. Science, 346(6213), 1258096.

Du, S. J., Gong, Z., Fletcher, G. L., Shears, M. A., King, M. J., Idler, D. R., & Hew, C. L. (1992). Growth enhancement in transgenic Atlantic salmon by the use of an 'all fish' chimeric growth hormone gene construct. Biotechnology, 10(2), 176–181.

Dunham, R. A. (2022). Aquaculture and Fisheries Biotechnology: Genetic Approaches (3rd ed.). CABI Publishing.

Dusinska, M., Tulinska, J., El Yamani, N., Kuricova, M., Liskova, A., Rollerova, E., Rundén-Pran, E., & Smolkova, B. (2017). Immunotoxicity, genotoxicity and epigenetic toxicity of nanomaterials: New strategies for toxicity testing? Food and Chemical Toxicology, 109, 797–811.

Edvardsen, R. B., Leininger, S., Kleppe, L., Skaftnesmo, K. O., & Wargelius, A. (2014). Targeted mutagenesis in Atlantic salmon (Salmo salar L.) using the CRISPR/Cas9 system induces complete knockout individuals in the F0 generation. PLOS ONE, 9(9), e108622.

Eknath, A. E., Bentsen, H. B., Ponzoni, R. W., Rye, M., Nguyen, N. H., Thodesen, J., & Gjøen, H. M. (2007). Genetic improvement of farmed tilapias: Composition and genetic parameters of a synthetic base population of Oreochromis niloticus for selective breeding. Aquaculture, 273(1), 1–14.

Esteve, M., Gilmour, K. M., & Dufresne, F. (2022). History and genetics of the fancy goldfish: Understanding how artificial selection

shaped the genomes of domesticated fish. Frontiers in Genetics, 13, 890455.

European Commission. (2017). Study on the Economic Contribution of the Blue Economy Sectors and Their Sustainable Development. Publications Office of the European Union.

Falconer, D. S., & Mackay, T. F. C. (1996). Introduction to Quantitative Genetics (4th ed.). Longman.

FAO. (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022: Towards Blue Transformation. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO/WHO. (2021). Safety Assessment of Foods and Feeds Derived from Transgenic Crops, Volume 3. FAO.

FDA. (2015). AquAdvantage Salmon – Approval Letter and Appendices. U.S. Food and Drug Administration.

Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J. A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., & Sunde, L. M. (2018). Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. Biosystems Engineering, 173, 176–193.

Garibyan, L., & Avashia, N. (2013). Polymerase chain reaction. Journal of Investigative Dermatology, 133(3), e6.

Gatlin, D. M., Barrows, F. T., Brown, P., Dabrowski, K., Gaylord, T. G., Hardy, R. W., Herman, E., Hu, G., Krogdahl, A., Nelson, R., Rust, M., Sealey, W., Skonberg, D., Souza, E. J., Stone, D., Wilson, R., & Wurtele, E. (2006). Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: A review. Aquaculture Research, 38(6), 551–579.

Genç, M. A., Genç, E., Kayiş, S., Yilmaz, E., & Günal, A. C. (2022). Genotype-by-environment interaction for growth in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) reared under different thermal and saline conditions. Aquaculture, 558, 738361.

Gjedrem, T. (2012). Genetic improvement for the development of efficient global aquaculture: A personal opinion review. Aquaculture, 344-349, 12–22.

Gjedrem, T., & Baranski, M. (2009). Selective Breeding in Aquaculture: An Introduction. Springer.

Gjedrem, T., Robinson, N., & Rye, M. (2012). The importance of selective breeding in aquaculture to meet future demands for animal protein: A review. Aquaculture, 350-353, 117–129.

Goodwin, S., McPherson, J. D., & McCombie, W. R. (2016). Coming of age: Ten years of next-generation sequencing technologies. Nature Reviews Genetics, 17(6), 333–351.

Griffiths, A. J. F., Wessler, S. R., Carroll, S. B., & Doebley, J. (2020). Introduction to Genetic Analysis (12th ed.). W. H. Freeman.

Handisyde, N., Telfer, T. C., & Ross, L. G. (2017). Vulnerability of aquaculture-related livelihoods to changing climate at the global scale. Fish and Fisheries, 18(3), 466–488.

Health Canada. (2013). Novel Food Information: Genetically Engineered Atlantic Salmon (AquAdvantage® Salmon). Government of Canada.

Hebert, P. D. N., Cywinska, A., Ball, S. L., & deWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. Proceedings of the Royal Society B, 270(1512), 313–321.

Helyar, S. J., Hemmer-Hansen, J., Bekkevold, D., Taylor, M. I., Ogden, R., a selection model. Biometrics, 31(2), 423–447.

Hindson, B. J., Ness, K. D., Masquelier, D. A., Belgrader, P., Heredia, N. J., Makarewicz, A. J., Bright, I. J., Lucero, M. Y., Hiddessen, A. L., & Legler, T. C. (2011). High-throughput droplet digital PCR system for absolute quantitation of DNA copy number. Analytical Chemistry, 83(22), 8604–8610.

Howard, R., Carriquiry, A. L., & Beavis, W. D. (2019). Parametric and nonparametric statistical methods for genomic selection of traits with additive and epistatic genetic architectures. G3: Genes, Genomes, Genetics, 4(6), 1027–1046.

Hsu, P. D., Lander, E. S., & Zhang, F. (2014). Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering. Cell, 157(6), 1262–1278.

Hulata, G. (2001). Genetic manipulations in aquaculture: A review of stock improvement by classical and modern technologies. Genetica, 111(1-3), 155–173.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jonsson, B., & Jonsson, N. (2019). A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon Salmo salar and brown trout Salmo trutta, with particular reference to water temperature and flow. Journal of Fish Biology, 75(10), 2381–2447.

Kaiser, M. (2005). Wetlands: A Vision for Regulatory Reform. Springer.

KKH (Komisi Keamanan Hayati). (2019). Panduan Pengkajian Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetika di Indonesia. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.

Kjøglum, S., Larsen, S., Bakke, H. G., & Grimholt, U. (2008). How specific MHC class I and class II combinations affect disease resistance against infectious salmon anaemia in Atlantic salmon (Salmo salar). Fish & Shellfish Immunology, 23(5), 880–888.

Lien, S., Koop, B. F., Sandve, S. R., Miller, J. R., Kent, M. P., Nome, T., Hvidsten, T. R., Leong, J. S., Minkley, D. R., Zimin, A., Grammes, F., Grove, H., Gjuvsland, A., Walenz, B., Hermansen, R. A., von Schalburg, K., Rondeau, E. B., Di Genova, A., Samy, J. K. A., … Davidson, W. S. (2016). The Atlantic salmon genome provides insights into rediploidization. Nature, 533(7602), 200–205.

Lillehammer, M., Hayes, B. J., Meuwissen, T. H. E., & Sonesson, A. K. (2013). Genomic selection for two traits in aquaculture breeding schemes. Journal of Animal Science, 91(6), 2949–2957.

Liu, Z. J., & Cordes, J. F. (2004). DNA marker technologies and their applications in aquaculture genetics. Aquaculture, 238(1-4), 1–37.

Lynch, M., & Walsh, B. (1998). Genetics and Analysis of Quantitative Traits. Sinauer Associates.

Magnadóttir, B. (2006). Innate immunity of fish (overview). Fish & Shellfish Immunology, 20(2), 137–151.

Mair, G. C., Scott, A. G., Penman, D. J., Beardmore, J. A., & Skibinski, D. O. F. (1991). Sex determination in the genus Oreochromis: 1. Sex reversal, gynogenesis and triploidy in O. niloticus (L.). Theoretical and Applied Genetics, 82(2), 144–152.

Mardis, E. R. (2011). A decade's perspective on DNA sequencing technology. Nature, 470(7333), 198–203.

Marko, P. B., Lee, S. C., Rice, A. M., Gramling, J. M., Fitzhenry, T. M., McAlister, J. S., Harper, G. R., & Moran, A. L. (2004). Mislabelling of a depleted reef fish. Nature, 430(6997), 309–310.

Meyer, K. (2007). WOMBAT A tool for mixed model analyses in quantitative genetics by restricted maximum likelihood (REML). Journal of Zhejiang University Science B, 8(11), 815–821.

Meuwissen, T. H. E. (1997). Maximizing the response of selection with a predefined rate of inbreeding. Journal of Animal Science, 75(4), 934–940.

Meuwissen, T. H. E., Hayes, B. J., & Goddard, M. E. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. Genetics, 157(4), 1819–1829.

Meuwissen, T., Hayes, B., & Goddard, M. (2016). Genomic selection: A paradigm shift in animal breeding. Animal Frontiers, 6(1), 6–14.

Moen, T., Baranski, M., Sonesson, A. K., & Kjøglum, S. (2009). Confirmation and fine-mapping of a major QTL for resistance to infectious pancreatic necrosis in Atlantic salmon (Salmo salar): Population-level associations between markers and trait. BMC Genomics, 10(1), 368.

Moelyowati, I., Priyadi, A., & Kusumah, R. V. (2016). Development of aquaculture in Indonesia: Challenges and opportunities. Prosiding Forum Inovasi Teknologi Akuakultur, 3, 1–12.

Morais, S., Silva, T., Cordeiro, O., Rodrigues, P., Guy, D. R., Bron, J. E., Taggart, J. B., Bell, J. G., & Tocher, D. R. (2012). Effects of genotype and dietary fish oil replacement with vegetable oil on the intestinal transcriptome and proteome of Atlantic salmon (Salmo salar). BMC Genomics, 13, 448.

Mrode, R. A. (2014). Linear Models for the Prediction of Animal Breeding Values (3rd ed.). CABI Publishing.

Muhlfeld, C. C., Kalinowski, S. T., McMahon, T. E., Taper, M. L., Painter, S., Leary, R. F., & Allendorf, F. W. (2009). Hybridization rapidly reduces fitness of a native trout in the wild. Biology Letters, 5(3), 328–331.

Mulder, H. A. (2016). Genomic selection improves response to selection in resilience by exploiting genotype by environment interactions. Frontiers in Genetics, 7, 178.

Mullis, K., Faloona, F., Scharf, S., Saiki, R., Horn, G., & Erlich, H. (1986). Specific enzymatic amplification of DNA in vitro: The

polymerase chain reaction. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 51, 263–273.

Mylonas, C. C., Fostier, A., & Zanuy, S. (2010). Broodstock management and hormonal manipulations of fish reproduction. General and Comparative Endocrinology, 165(3), 516–534.

Mylonas, C. C., & Zohar, Y. (2001). Use of GnRHa-delivery systems for the control of reproduction in fish. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 10(4), 463–491.

Nagoya Protocol. (2010). Nagoya Protocol on Access to Genetic Resources and the Fair and Equitable Sharing of Benefits Arising from Their Utilization to the Convention on Biological Diversity. UNEP.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Preparing for Future Products of Biotechnology. The National Academies Press.

Nguyen, N. H. (2016). Genetic improvement for important farmed aquaculture species with a reference to carp, tilapia and prawns in Asia and the Pacific: A review. Aquaculture Research, 47(7), 2196–2222.

Ødegård, J., Moen, T., Santi, N., Korsvoll, S. A., Kjøglum, S., & Meuwissen, T. H. E. (2014). Genomic prediction in an admixed population of Atlantic salmon (Salmo salar). Frontiers in Genetics, 5, 402.

Ogden, R., Gharbi, K., Mugue, N., Martinsohn, J., Senn, H., Davey, J. W., Pourkazemi, M., McEwing, R., Eland, C., Taggart, J., Sergeev, A., & Okello, J. (2013). Sturgeon conservation genomics: SNP discovery and validation using RAD sequencing. Molecular Ecology, 22(11), 3112–3123.

Osmundsen, T. C., Olsen, M. S., & Olafsen, T. (2017). A wicked promise? Governance challenges of marine biotechnology. Marine Policy, 85, 154–160.

Palaiokostas, C., Bekaert, M., Khan, M. G. Q., Taggart, J. B., Gharbi, K., McAndrew, B. J., & Penman, D. J. (2016). Mapping and validation of the major sex-determining region in Nile tilapia (Oreochromis niloticus L.) using RAD sequencing. PLOS ONE, 8(7), e68389.

Palmer, C. (2011). Animal Ethics in Context. Columbia University Press.

Pérez-Ramírez, M., Barceló, C., Marçalo, A., & Saborido-Rey, F. (2020). Estimation and genetic parameters of somatic growth and food conversion efficiency in Atlantic bluefin tuna. Aquaculture, 525, 735316.

Pevsner, J. (2015). Bioinformatics and Functional Genomics (3rd ed.). Wiley-Blackwell.

Ponzoni, R. W., & Nguyen, N. H. (2008). Proceedings of a Workshop on the Development of a Genetic Improvement Program for African Catfish Clarias gariepinus. WorldFish Center.

Ponzoni, R. W., Nguyen, N. H., Khaw, H. L., Hamzah, A., Bakar, K. R. A., & Yee, H. Y. (2016). Genetic improvement of Nile tilapia (Oreochromis niloticus) with special reference to the work conducted by the WorldFish Center with the GIFT strain. Reviews in Aquaculture, 3(1), 27–41.

Poynter, S. E., & DeWoody, J. A. (2009). Quantifying transcript abundance: A comparison of methods using samples from two different fish species. Aquaculture, 289(3-4), 282–289.

Quiniou, S. M. A., Waldbieser, G. C., & Wheeler, P. A. (2013). Genetic architecture of disease resistance in rainbow trout. In C. C. Beaulieu (Ed.), Disease Resistance in Aquatic Organisms. Springer.

Reed, D. H., & Frankham, R. (2003). Correlation between fitness and genetic diversity. Conservation Biology, 17(1), 230–237.

Ringø, E., Olsen, R. E., Gifstad, T. Ø., Dalmo, R. A., Amlund, H., Hemre, G. I., & Bakke, A. M. (2010). Prebiotics in aquaculture: A review. Aquaculture Nutrition, 16(2), 117–136.

Rodrigues, P. M., Silva, T. S., Dias, J., & Jessen, F. (2012). PROTEOMICS in aquaculture: Applications and trends. Journal of Proteomics, 75(14), 4325–4345.

Shinn, A. P., Pratoomyot, J., Bron, J., Paladini, G., Brooker, E. E., & Brooker, A. J. (2015). Economic costs of protistan and metazoan parasites to global mariculture. Parasitology, 142(1), 196–270.

Stacey, N. (2015). Hormonally-induced spawning in fish: A review. Physiology & Behavior, 145, 1–20.

Taberlet, P., Coissac, E., Hajibabaei, M., & Rieseberg, L. H. (2012). Environmental DNA. Molecular Ecology, 21(8), 1789–1793.

Tocher, D. R. (2015). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids and aquaculture in perspective. Aquaculture, 449, 94–107.

Tocher, D. R., Betancor, M. B., Sprague, M., Olsen, R. E., & Napier, J. A. (2019). Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: Bridging the gap between supply and demand. Nutrients, 11(1), 89.

Tsai, S. Q., & Joung, J. K. (2016). Defining and improving the genome-wide specificities of CRISPR–Cas9 nucleases. Nature Reviews Genetics, 17(5), 300–312.

UN. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.

UN. (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division.

Vallejo, R. L., Leeds, T. D., Gao, G., Parsons, J. E., Martin, K. E., Evenhuis, J. P., Fragomeni, B. O., Wiens, G. D., & Palti, Y. (2017). Genomic selection models double the accuracy of predicted breeding values for bacterial cold water disease resistance compared to a traditional pedigree-based model in rainbow trout aquaculture. Genetics Selection Evolution, 49, 17.

Van Eenennaam, A. L., Ott, T. L., & Gibbons, W. R. (2019). A fish tale: The regulatory saga of AquAdvantage salmon. EMBO Reports, 20(5), e47682.

van Dooren, T. (2007). Terminated seed: Death, proprietary kinship and the production of (bio)wealth. Science as Culture, 16(1), 71–93.

Vallejo, R. L. *et al*. (2017). Ibid.

Wang, Z., Gerstein, M., & Snyder, M. (2009). RNA-Seq: A revolutionary tool for transcriptomics. Nature Reviews Genetics, 10(1), 57–63.

Ward, R. D., Zemlak, T. S., Innes, B. H., Last, P. R., & Hebert, P. D. N. (2005). DNA barcoding Australia's fish species. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 360(1462), 1847–1857.

Watson, J. D., & Crick, F. H. C. (1953). A structure for deoxyribose nucleic acid. Nature, 171(4356), 737–738.

Yáñez, J. M., Bassini, L. N., & Yoshida, G. M. (2023). Breeding for disease resistance in aquaculture: From quantitative genetics to genomics. Reviews in Aquaculture, 15(2), 723–747.

Yáñez, J. M., Naswa, S., López, M. E., Bassini, L., Correa, K., Gilbey, J., Bernatchez, L., Norris, A., Casey, J., & Sánchez, J. (2016). Genome-wide single nucleotide polymorphism discovery in

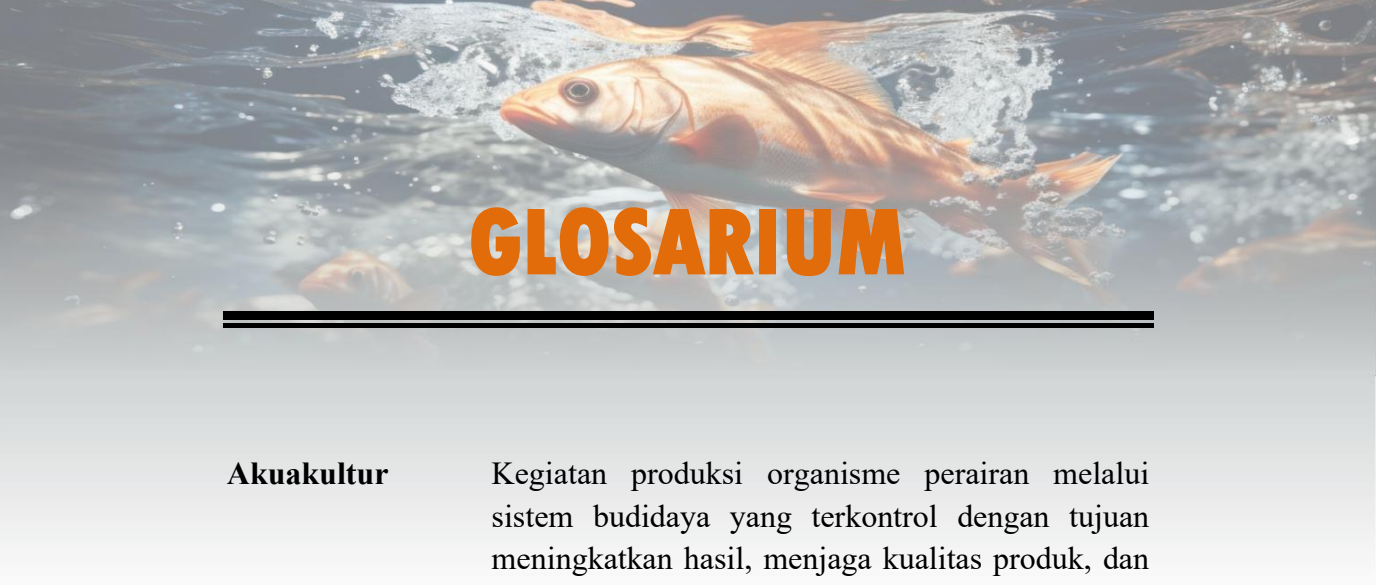
Atlantic salmon (Salmo salar): validation in wild and farmed American and European populations. Molecular Ecology Resources, 16(4), 1002–1011.

Yaron, Z., & Levavi-Sivan, B. (2011). Endocrine control of reproduction. In A. P. Farrell (Ed.), Encyclopedia of Fish Physiology (Vol. 2, pp. 1500–1508). Academic Press.

Zhao, S., Zhang, Q., Liu, M., Zhao, H., Ma, C., Wang, T., & Li, N. (2021). Regulation of plant responses to salt stress. International Journal of Molecular Sciences, 22(8), 4609.

Zhong, Z., Niu, P., Wang, M., Huang, G., Xu, S., Sun, Y., Xu, X., Hou, Y., Sun, X., Yan, Y., & Wang, H. (2016). Targeted disruption of sp7 and myostatin with CRISPR-Cas9 results in severe bone defects and more muscular cells in common carp. Scientific Reports, 6, 22953.

Zohar, Y., Muñoz-Cueto, J. A., Bharat Bhanu, D., & Kah, O. (2010). Neuroendocrinology of reproduction in teleost fish. General and Comparative Endocrinology, 165(3), 438–455.



# GLOSARIUM

**Akuakultur** Kegiatan produksi organisme perairan melalui sistem budidaya yang terkontrol dengan tujuan meningkatkan hasil, menjaga kualitas produk, dan memenuhi kebutuhan pangan serta ekonomi masyarakat.

**Alel** Bentuk alternatif dari suatu gen yang berada pada lokus yang sama dalam kromosom homolog dan berkontribusi terhadap variasi sifat yang muncul dalam suatu individu atau populasi.

**Androgenesis** Metode reproduksi khusus yang menghasilkan individu dengan materi genetik yang seluruhnya berasal dari induk jantan melalui manipulasi proses perkembangan embrio.

**Biodiversitas** Tingkat keanekaragaman kehidupan yang mencakup variasi genetik, spesies, dan ekosistem yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan serta keberlanjutan sumber daya hayati.

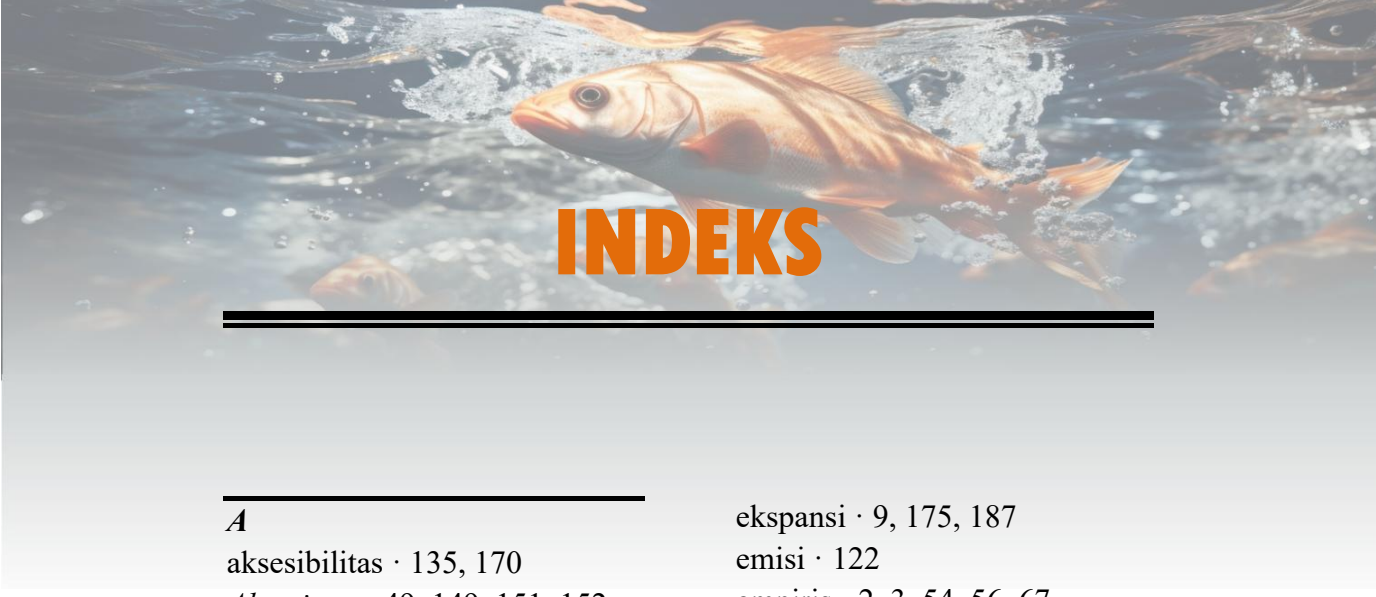
**Bioteknologi** Bidang ilmu terapan yang memanfaatkan organisme hidup, sel, jaringan, enzim, atau komponen biologis lainnya melalui berbagai teknik ilmiah untuk menghasilkan produk, jasa, dan inovasi yang dapat meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan kualitas dalam berbagai sektor kehidupan.

**Fenotipe** Keseluruhan karakteristik yang tampak atau dapat diamati pada suatu organisme, termasuk bentuk tubuh, warna, pertumbuhan, dan perilaku, yang merupakan hasil interaksi antara faktor genetik dan lingkungan.

| | |
|---|---|
| **Fertilisasi** | Tahap penting dalam reproduksi seksual yang terjadi ketika sel sperma dan sel telur bersatu membentuk zigot yang mengandung kombinasi materi genetik dari kedua induk. |
| **Genetika** | Cabang ilmu biologi yang mempelajari struktur, fungsi, variasi, dan pewarisan gen dari induk kepada keturunannya, termasuk mekanisme yang mengatur ekspresi sifat, keragaman biologis, serta perubahan genetik yang terjadi dalam suatu populasi dari waktu ke waktu. |
| **Genom** | Keseluruhan informasi genetik yang tersimpan dalam DNA suatu organisme yang mencakup seluruh gen dan sekuens pengatur yang berperan dalam mengendalikan pertumbuhan, perkembangan, metabolisme, reproduksi, dan respons terhadap lingkungan. |
| **Genotipe** | Susunan atau komposisi genetik yang dimiliki oleh suatu individu yang menjadi dasar bagi pembentukan berbagai karakter biologis dan menentukan potensi sifat yang dapat diekspresikan. |
| **Genotiping** | Proses identifikasi dan analisis variasi genetik suatu individu dengan menggunakan teknik molekuler untuk menentukan susunan gen yang dimiliki dan hubungannya dengan karakter tertentu. |
| **Ginogenesis** | Teknik reproduksi yang menghasilkan keturunan dengan materi genetik yang hanya berasal dari induk betina melalui aktivasi telur tanpa kontribusi genetik dari sperma. |
| **Hereditas** | Mekanisme biologis yang memungkinkan informasi genetik diturunkan dari satu generasi ke generasi berikutnya melalui gen sehingga berbagai karakteristik organisme dapat diwariskan dan dipertahankan. |
| **Hibridisasi** | Teknik persilangan antara dua individu, strain, atau populasi yang berbeda secara genetik dengan tujuan menggabungkan sifat-sifat unggul dari masing- |

| | |
|---|---|
| | masing induk sehingga diperoleh keturunan yang memiliki performa lebih baik. |
| **Inseminasi** | Teknik reproduksi berbantuan yang dilakukan dengan memasukkan sperma ke dalam sistem reproduksi betina secara terkontrol untuk meningkatkan peluang terjadinya pembuahan dan keberhasilan produksi benih. |
| **Kloning** | Teknologi reproduksi yang digunakan untuk menghasilkan individu, jaringan, atau sel yang memiliki susunan genetik identik dengan organisme asal melalui metode bioteknologi tertentu. |
| **Konservasi** | Upaya terencana untuk melindungi, mengelola, memulihkan, dan memanfaatkan sumber daya hayati secara bijaksana agar tetap tersedia dan berfungsi secara optimal bagi generasi sekarang maupun masa depan. |
| **Kromosom** | Struktur berbentuk benang yang tersusun atas DNA dan protein histon di dalam inti sel yang berfungsi sebagai pembawa informasi genetik serta memastikan pewarisan sifat berlangsung secara teratur selama proses pembelahan sel. |
| **Marker** | Penanda biologis, biokimia, atau molekuler yang digunakan untuk mengidentifikasi, melacak, dan menganalisis keberadaan gen atau karakter tertentu dalam suatu organisme secara lebih akurat. |
| **Mutasi** | Perubahan permanen pada urutan materi genetik yang dapat terjadi secara alami maupun akibat faktor eksternal dan berpotensi menghasilkan variasi sifat baru yang dapat bersifat menguntungkan, merugikan, atau netral. |
| **Pemuliaan** | Serangkaian kegiatan ilmiah yang dilakukan untuk memperbaiki kualitas genetik suatu populasi melalui seleksi, persilangan, dan metode reproduksi terkontrol guna menghasilkan keturunan yang memiliki karakter unggul sesuai tujuan budidaya. |
| **Poliploidi** | Kondisi genetik ketika suatu organisme memiliki lebih dari dua set kromosom lengkap yang dapat |

| | |
|---|---|
| | memengaruhi ukuran tubuh, laju pertumbuhan, tingkat kesuburan, dan karakter biologis lainnya. |
| **Reproduksi** | Proses biologis yang memungkinkan organisme menghasilkan keturunan baru melalui mekanisme seksual maupun aseksual sehingga keberlangsungan spesies dapat terjaga dari generasi ke generasi. |
| **Seleksi** | Proses identifikasi dan pemilihan individu-individu terbaik berdasarkan karakter fenotipe maupun genotipe tertentu agar sifat-sifat unggul tersebut dapat diwariskan secara konsisten kepada generasi berikutnya. |
| **Sequensing** | Metode laboratorium yang digunakan untuk menentukan urutan nukleotida dalam molekul DNA atau RNA sehingga informasi genetik dapat dipahami, dianalisis, dan dimanfaatkan untuk berbagai tujuan penelitian. |
| **Transgenik** | Istilah yang merujuk pada organisme yang telah dimodifikasi secara genetik melalui penyisipan gen dari organisme lain sehingga memiliki karakter baru yang tidak diperoleh melalui proses reproduksi alami. |



# INDEKS


***A***

aksesibilitas · 135, 170
*Algoritma* · 49, 149, 151, 152, 157

***B***

*big data* · i, 49, 50, 147, 148, 155, 156, 157, 159, 160, 185, 187

***C***

*cloud* · 147, 148, 149, 155, 156

***D***

diferensiasi · 26, 28, 29, 71, 72, 101
digitalisasi · 147
distribusi · 22, 23, 26, 49, 54, 133, 157, 159, 163, 171, 175
domestik · 173, 179

***E***

ekonomi · 8, 9, 11, 12, 43, 45, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 73, 74, 76, 77, 79, 83, 84, 94, 96, 101, 103, 104, 105, 108, 136, 138, 141, 144, 145, 152, 163, 171, 172, 173, 178, 179, 180, 182, 183, 184, 188, 200, 208
ekspansi · 9, 175, 187
emisi · 122
empiris · 2, 3, 54, 56, 67

***F***

finansial · 171
fleksibilitas · 70, 112, 113, 114, 124
fluktuasi · 27, 54, 125
fundamental · 4, 19, 57, 102, 162

***G***

genetika · i, 1, 2, 3, 4, 6, 7, 11, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 30, 31, 32, 34, 41, 43, 46, 47, 56, 73, 79, 83, 102, 103, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 140, 162, 164, 165, 166, 167, 168, 170, 178, 186, 187
geografis · 17, 123

***I***

implikasi · 102, 120, 141
infrastruktur · 45, 48, 49, 156, 176, 178, 180, 185, 187
inklusif · 183
inovatif · 157, 176, 177, 185, 186

integrasi · 7, 32, 39, 72, 74, 86, 98, 104, 105, 129, 136, 146, 148, 150, 156, 158, 161, 166, 172, 177, 183, 184, 185, 186, 187, 208
integritas · 67, 70, 120
investasi · 112, 114, 115, 170, 171, 178, 180, 188

***K***
kolaborasi · 182, 184, 186, 188
komoditas · 179, 180
komparatif · 122, 123
komprehensif · i, 42, 45, 56, 93, 96, 97, 98, 101, 121, 130, 133, 146, 164, 174, 179, 185, 208
komputasi · 42, 49, 50, 101, 147, 152, 153, 154
konsistensi · 56, 85

***M***
manipulasi · 6, 59, 65, 66, 71, 72, 73, 74, 103, 162, 163, 176, 200
metodologi · 37, 84
mikroorganisme · 118, 141, 142, 143, 145, 164, 165, 178, 179

***N***
non-tarif · 114
Nutrisi · iv, 131, 132, 134, 135, 136, 181

***P***
proyeksi · 174

***R***
*real-time* · 50, 92, 93, 128, 129, 139, 156, 158, 159, 160, 161, 178
regulasi · 9, 10, 20, 59, 66, 76, 96, 102, 103, 105, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 118, 119, 121, 122, 123, 126, 130, 132, 135, 140, 145, 153, 165, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 178, 185, 187
relevansi · 173, 180
revolusi · 5, 46, 92

***S***
*Skema* · 106
stabilitas · 11, 13, 14, 18, 20, 21, 27, 55, 56, 69, 77, 81, 88, 103, 105, 112, 148, 165
stakeholder · 171, 172

***T***
transformasi · 1, 7, 48, 102, 148, 150, 157, 175, 186, 187

***U***
universal · 17, 22, 24

***V***
varietas · 75, 77, 169, 170

# BIOGRAFI PENULIS



**Dr. Ervina Indrayani, S.Si., M.Si.**

Lahir di Abepura, 06 Juni 1982. Lulus Program Doktor di Fakultas Biologi, Universitas Gadjah Mada tahun 2016. Saat ini sebagai Dosen Aktif di Universitas Cenderawasih pada Program Studi Ilmu Perikanan, Jurusan Ilmu Kelautan dan Perikanan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.



**Kristina Haryati, M.Si.**

Lahir di Serui, 21 Juli 1990. Lulus S2 di Program Studi Teknologi Hasil Perairan FPIK Institut Pertanian Bogor tahun 2017. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Cenderawasih pada Program Studi Ilmu Perikanan FMIPA.



**Dr. Agus Putra AS**.

Lahir di Langsa tahun 1980. Penulis menyelesaikan Pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Riau. Kemudian, tahun 2006 melanjutkan pendidikannya ke jenjang S2 dan mendapatkan gelar Master of Science Aquaculture dari Institute of Tropical Aquaculture, University Malaysia Terengganu di tahun 2008. Kemudian pada tahun 2010, penulis menempuh pendidikan Doctoral di Department of Aquaculture, National Taiwan Ocean University, Taiwan, dan lulus tahun 2014. Saat ini penulis bertugas sebagai dosen tetap di Program Studi Akuakultur, Universitas Samudra. Selain aktif menulis artikel ilmiah, penulis juga aktif menulis buku dan bahan ajar tentang perikanan, serta mengikuti seminar dan konferensi internasional.



**Dr. Dwi Indah Widya Yanti, M.Si.**

Lahir di Sorong, 21 Juli 1983. Lulus S3 di Program Studi Ilmu Kelautan FPIK Universitas Sam Ratulangi tahun 2022. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Kristen Papua pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Pertanian.

*Buku Referensi*

# PERIKANAN BUDIDAYA

## PEMULIAAN IKAN BERBASIS BIOTEKNOLOGI

Buku referensi ini membahas secara khusus membahas pemuliaan ikan berbasis bioteknologi modern. Buku ini membahas secara ringkas pemuliaan ikan dalam perikanan budidaya berbasis bioteknologi, mulai dari konsep dasar genetika hingga penerapan teknologi modern. Buku ini dirancang dengan pendekatan integratif yang menghubungkan teori genetika klasik dengan teknologi terkini seperti genomic selection, CRISPR-Cas9, kecerdasan buatan, dan big data. Setiap bab disusun secara sistematis mulai dari konsep dasar hingga aplikasi mutakhir, dilengkapi dengan diagram, tabel, dan studi kasus yang relevan. Buku ini menjadi referensi ringkas tentang transformasi akuakultur menuju sistem pemuliaan yang lebih presisi, efisien, dan berkelanjutan berbasis bioteknologi modern.

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

mediapenerbitindonesia.com
+6281362150605
Penerbit Idn
@pt.mediapenerbitidn

ISBN 978-634-316-076-2
9 786343 160762