



BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG UNTUK PRODUKSI BENIH BERKELANJUTAN

Penulis:

Lorichika Gustinda L, Dewi Nuryanti Fazrin,
Mita Alvionita, Elfa Verda Puspita, Marita Ika Joesidawati,
Riska Puluhulawa, Atma Jaya Salman Muin,
Ridha Hiola, Megawati Wijaya

BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG UNTUK PRODUKSI BENIH BERKELANJUTAN

**Lorichika Gustinda L
Dewi Nuryanti Fazrin
Mita Alvionita
Elfa Verda Puspita
Marita Ika Joesidawati
Riska Puluhulawa
Atma Jaya Salman Muin
Ridha Hiola
Megawati Wijaya**



GET PRESS INDONESIA

BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG UNTUK PRODUKSI BENIH BERKELANJUTAN

Penulis :

Lorichika Gustinda L
Dewi Nuryanti Fazrin
Mita Alvionita
Elfa Verda Puspita
Marita Ika Joesidawati
Riska Puluhulawa
Atma Jaya Salman Muin
Ridha Hiola
Megawati Wijaya

ISBN : 978-634-255-637-5

Editor : Diana Purnama Sari., M.E

Penyunting : Tri Putri Wahyuni., S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Agustus 2026

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Bioteknologi Reproduksi Udang Untuk Produksi Benih Berkelanjutan ini.

Buku Ini Membahas : Pendahuluan Bioteknologi Reproduksi Udang (Pengertian bioteknologi reproduksi, urgensi produksi benih berkelanjutan, dan peran strategis udang dalam akuakultur), Biologi Reproduksi Udang sebagai Dasar Bioteknologi (Struktur sistem reproduksi, gonadogenesis, dan siklus reproduksi udang), Diferensiasi Kelamin pada Udang (Proses biologis penentuan dan perkembangan kelamin serta implikasinya terhadap produksi benih), Endokrinologi Reproduksi Udang (Peran hormon dan kelenjar endokrin dalam pengaturan fungsi reproduksi), Pendekatan Molekuler dalam Bioteknologi Reproduksi Udang (Pemanfaatan teknik molekuler seperti qPCR dan marker gen dalam kajian reproduksi), Peran Lingkungan dalam Regulasi Reproduksi Udang (Pengaruh faktor lingkungan seperti suhu, pH, salinitas, dan kualitas air terhadap proses reproduksi), Nutrisi dan Metabolisme Reproduksi Udang (Peran nutrien, metabolisme energi, dan suplemen nutrisi terhadap pematangan gonad dan kualitas benih), Produksi Benih Udang Berkelanjutan (Integrasi bioteknologi, manajemen hatchery, dan prinsip keberlanjutan produksi benih), Permasalahan dan Tantangan Bioteknologi Reproduksi Udang (Kendala biologis, teknis, dan etika dalam penerapan bioteknologi reproduksi).

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah

memperkirakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB 1 PENDAHULUAN BIOTEKNOLOGI	
REPRODUKSI UDANG.....	1
1.1 Peran Strategis Udang dalam Industri Akuakultur	1
1.1.1 Potensi Ekonomi dan Pasar Global.....	1
1.1.2 Penyedia Sumber Protein Dunia dan Ketahanan Pangan.....	3
1.1.3 Dampak Sosial-Ekonomi dan Kesejahteraan Pembudidaya	4
1.2 Pengertian dan Ruang Lingkup Bioteknologi Reproduksi Udang.....	5
1.2.1 Evolusi dari Metode Konvensional ke Pendekatan Modern	6
1.2.2 Aplikasi Manipulasi Hormonal Eksogen.....	7
1.2.3 Intervensi Genetik Molekuler: RNAi dan CRISPR/Cas9	8
1.2.4 Kriopreservasi Sperma dan Teknologi Populasi Monoseks	8
1.2.5 Integrasi Sistem Akuakultur dan Perspektif Keberlanjutan Global	9
1.3 Urgensi Produksi Benih Udang Berkelanjutan (<i>Sustainable Seed Production</i>)	10
1.3.1 Tantangan <i>Broodstock</i> (Induk) dari Alam	11
1.3.2 Ancaman Penyakit dan Kegagalan <i>Hatchery</i>	12
1.3.3 Konsep Keberlanjutan melalui Kemandirian <i>Hatchery</i>	13
DAFTAR PUSTAKA	15
BAB 2 BIOLOGI REPRODUKSI UDANG SEBAGAI DASAR BIOTEKNOLOGI.....	21
2.1 Anatomi dan Histologi Sistem Reproduksi Komparatif	21
2.1.1 Diferensiasi Morfologi Organ Reproduksi Jantan dan Betina	21

2.1.2 Struktur Histologis Gonad pada Berbagai Tingkat Kematangan	25
2.2 Dinamika Gonadogenesis dan Pematangan Seksual Krustasea.....	29
2.2.1 Tahapan Vitellogenesis, Sintesis Kuning Telur, dan Perkembangan Oosit.....	29
2.2.2 Proses Spermatogenesis dan Mekanisme Pembentukan Spermatofor.....	31
2.3 Siklus Reproduksi dan Sistem Regulasi Neuroendokrin	34
2.3.1 Sinkronisasi Antara Siklus Molting (Ecdysis) dengan Siklus Reproduksi.....	34
DAFTAR PUSTAKA.....	39
BAB 3 DIFERENSIASI KELAMIN PADA UDANG.....	41
3.1 Dasar Biologi Reproduksi Udang.....	42
3.2 Proses Diferensiasi Kelamin	45
3.3 Peran Hormon dalam Diferensiasi Kelamin.....	48
3.4 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi	51
3.5 Teknologi Manipulasi Kelamin	55
3.6 Implikasi terhadap Produksi Benih	57
3.7 Tantangan dan Prospek Penelitian.....	59
DAFTAR PUSTAKA.....	63
BAB 4 ENDOKRINOLOGI REPRODUKSI UDANG: PERAN HORMON DAN KELENJAR ENDOKRIN DALAM PENGATURAN FUNGSI REPRODUKSI	65
4.1 Konsep Dasar Endokrinologi Reproduksi Udang.....	67
4.2 Organ Dan Kelenjar Endokrin Pada Udang	69
4.2.1 Kompleks X-Organ/Sinus Gland	69
4.2.2 Organ Mandibular	69
4.2.3 Organ Y	70
4.2.4 Ganglion Saraf dan Sistem Neurosekretori	71
4.2.5 Hepatopankreas sebagai Organ Pendukung Reproduksi.....	71
4.3 Hormon-Hormon Pengatur Reproduksi Udang	72
4.3.1 <i>Gonad Inhibiting Hormone</i> (GIH)	72
4.3.2 <i>Vitellogenesis Inhibiting Hormone</i> (VIH).....	73
4.3.3 <i>Mandibular Organ Inhibiting Hormone</i> (MOIH)	73

4.3.4 <i>Methyl Farnesoate</i> (MF)	74
4.3.5 Serotonin.....	75
4.3.6 Dopamin.....	76
4.3.7 Peran <i>Ecdysteroid</i> dalam Reproduksi Udang....	78
4.3.8 Neuropeptida dan Faktor Reproduksi yang Baru Teridentifikasi	79
4.4 Vitelogenesis Dan Pematangan Gonad.....	81
4.4.1 Konsep Dasar dan Signifikansi Vitelogenesis...	81
4.4.2 Sintesis dan Regulasi Vitellogenin	82
4.4.3 Transportasi Vitellogenin dan Pembentukan Vitellin	83
4.4.4 Tahapan Perkembangan Ovarium	84
4.4.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Vitelogenesis	85
DAFTAR PUSTAKA	87
BAB 5 PENDEKATAN MOLEKULER DALAM BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG (PEMANFAATAN TEKNIK MOLEKULER SEPERTI QPCR DAN MARKER GEN DALAM KAJIAN REPRODUKSI)	89
5.1 Identifikasi Gen Penentu Kelamin dan Diferensiasi Gonad	90
5.1.1 Peran Sentral Hormon IAG	90
5.1.2 Fungsi Konservatif Gen <i>Dmrt</i> dan <i>Foxl2</i>	90
5.1.3 Interaksi Kompleks dan Jaringan Regulasi.....	91
5.2 Pengembangan Penanda Genetik (Marker) untuk Seleksi dan Pemuliaan.....	92
5.2.1 Penanda untuk Diferensiasi Kelamin Awal	92
5.2.2 Penanda untuk Kualitas Reproduksi dan Pematangan Gonad	93
5.3 Aplikasi qPCR dalam Studi Reproduksi dan Deteksi Dini	95
5.3.1 Validasi Data Transkriptomik dan Dinamika Eksprei Gen.....	95
5.3.2 Deteksi Dini Perubahan Fisiologis dan Pembalikan Kelamin.....	96
5.3.3 Validasi Gen Referensi untuk Analisis qPCR yang Andal.....	96

5.3.4 Validasi Performa Analitik untuk Deteksi Patogen.....	97
5.4 Integrasi Omics: Menuju Pemahaman Holistik dan Produksi Berkelanjutan	97
5.4.1 Komponen Omics dalam Studi Reproduksi	98
5.4.2 Jaringan Regulasi Hormonal dan Genetik.....	99
5.4.3 Aplikasi Praktis untuk Produksi Berkelanjutan.....	100
5.4.4 Tantangan dan Perspektif Masa Depan.....	101
5.5 Kesimpulan.....	101
DAFTAR PUSTAKA.....	103
BAB 6 PERAN LINGKUNGAN DALAM REGULASI REPRODUKSI UDANG.....	107
6.1 Pengaruh Faktor Fisika Air terhadap Kecepatan Maturasi Gonad	108
6.1.1 Stimulasi Fluktuasi Suhu Kontrol dalam Memicu <i>Spawning</i>	108
6.1.2 Peran Tekanan Osmotik Salinitas Terhadap Kualitas Sperma dan Daya Tetas Telur	111
6.2 Peranan Faktor Kimia Air terhadap Stabilitas Reproduksi	114
6.2.1 Pengaruh Derajat Keasaman (pH) terhadap Laju Metabolisme Induk.....	115
6.2.2 Pengaruh Oksigen Terlarut (DO) terhadap Laju Metabolisme Induk.....	116
DAFTAR PUSTAKA.....	119
BAB 7 NUTRISI DAN METABOLISME REPRODUKSI UDANG.....	121
7.1 Peran Nutrient.....	121
7.2 Metabolisme Energi Udang.....	125
7.3 Suplemen Nutrisi Terhadap Pematangan Gonad dan Kualitas Benih	130
DAFTAR PUSTAKA.....	133
BAB 8 PRODUKSI BENIH UDANG BERKELANJUTAN (INTEGRASI BIOTEKNOLOGI, MANAJEMEN HATCHERY, DAN PRINSIP KEBERLANJUTAN PRODUKSI BENIH).....	139
8.1 Biologi dan Siklus Hidup Udang	142

8.1.1 Karakteristik Biologi Udang Budidaya	142
8.1.2 Siklus Hidup dan Tahapan Perkembangan Larva	145
8.1.3 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Perkembangan Larva.....	146
8.2 Manajemen Hatchery Dalam Produksi Benih Udang	148
8.2.1 Hatchery Modern	148
8.2.2 Sistem Resirkulasi (RAS)	150
8.2.3 Penerapan Biosecurity	151
8.2.4 Sistem Monitoring <i>Real-Time</i> (IoT)	152
8.3 Integrasi Bioteknologi dalam Produksi Benih Udang	153
8.4 Prinsip Keberlanjutan Produksi Benih Udang	155
DAFTAR PUSTAKA	158

BAB 9 “BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG

DALAM AKUAKULTUR MODERN: KENDALA

IMPLEMENTASI DAN TANTANGAN ETIKA” 163

9.1 Landasan Bioteknologi Reproduksi Udang.....	164
9.1.1 Seleksi Genetik dan Pemuliaan	164
9.1.2 Manipulasi Kematangan Gonad	164
9.1.3 Pendekatan Multi-Omics	165
9.1.4 Kriopreservasi dan Konservasi Genetik.....	165
9.2 Perkembangan Bioteknologi Reproduksi Dalam Akuakultur Modern	165
9.3 Kendala Implementasi Bioteknologi Reproduksi Udang	166
9.3.1 Kendala Biologis.....	167
9.3.2 Kendala Teknis	168
9.3.3 Kendala Ekonomi	169
9.3.4 Kendala Lingkungan	170
9.3.5 Kendala Sumber Daya Manusia.....	171
9.3.6 Kendala Regulasi dan Etika	172
9.3.7 Strategi Mengatasi Kendala.....	173
9.4 Tantangan Etika Dalam Bioteknologi Reproduksi Udang	173
9.4.1 Kesejahteraan Hewan	173
9.4.2 Erosi Keanekaragaman Genetik dan	

Tanggung Jawab Konservasi.....	175
9.4.3 Rekayasa Genetik dan Penerimaan Publik.....	175
9.4.4 Keadilan Akses Teknologi.....	176
DAFTAR PUSTAKA.....	177
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 8.1. Kisaran ideal untuk parameter kualitas air di hatchery	146
Tabel 8.2. Perbandingan sistem RAS dengan sistem tradisional	150

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Diagram Komparatif Arsitektur Thelycum (Udang Penaeid)	23
Gambar 6.1. Reaksi Akrosom	114
Gambar 7.1. Mekanisme regulasi <i>neuroendokrin</i> pada proses molting dan reproduksi krustasea.	123
Gambar 8.1. Morfologi Udang	143

BAB 1

PENDAHULUAN BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG

1.1 Peran Strategis Udang dalam Industri Akuakultur

Industri akuakultur global menempatkan budidaya udang pada posisi yang sangat strategis karena kontribusinya yang masif terhadap pertumbuhan ekonomi lintas negara, ketahanan pangan global, serta pembangunan sosial-ekonomi di berbagai wilayah pesisir dunia. Sebagai salah satu sektor pangan dengan pertumbuhan tercepat, budidaya udang bukan lagi sekadar aktivitas subsisten, melainkan telah bertransformasi menjadi industri padat teknologi dan modal yang mengintegrasikan manajemen rantai pasok global secara kompleks. Peningkatan signifikansi ini didorong oleh restrukturisasi pasar pangan dunia yang menuntut ketersediaan sumber protein laut berkualitas tinggi secara konsisten di tengah tren penurunan hasil tangkapan perikanan laut dari alam (salous et al., 2025). Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai peran strategis komoditas ini menjadi landasan teori yang krusial sebelum menelaah lebih jauh intervensi bioteknologi reproduksi yang diperlukan untuk menjaga stabilitas industrinya di masa depan.

1.1.1 Potensi Ekonomi dan Pasar Global

Dalam konstelasi perdagangan internasional, udang menonjol sebagai salah satu komoditas ekspor utama yang menghasilkan devisa bernilai miliaran dolar bagi negara-negara produsen. Negara berkembang, khususnya di Asia Tenggara seperti Vietnam, telah berhasil mengoptimalkan sektor akuakultur ini menjadi pilar utama pertumbuhan ekonomi nasional mereka, dengan capaian nilai ekspor yang menembus angka fantastis setiap tahunnya (Giang et al., 2025). Dinamika pasar global ini sangat dipengaruhi oleh poros permintaan dari

negara-negara maju dan berkembang padat penduduk seperti Amerika Serikat, Uni Eropa, dan Republik Rakyat Tiongkok. Fluktuasi ekonomi di wilayah-wilayah konsumen tersebut secara langsung membentuk pola produksi dan standar mutu yang harus dipenuhi oleh para pembudidaya di hulu, sehingga menciptakan jejaring interdependensi ekonomi yang sangat ketat (Giang et al., 2025).

Tren permintaan pasar global terhadap produk udang menunjukkan kurva peningkatan yang persisten dari tahun ke tahun, yang dipicu oleh perubahan gaya hidup masyarakat urban dan peningkatan kesadaran global akan pangan sehat. Untuk mengimbangi laju permintaan yang masif ini, industri akuakultur dipaksa untuk terus berinovasi dalam meningkatkan produktivitas lahan per satuan luas, yang salah satunya dimanifestasikan melalui modernisasi formulasi pakan. Inovasi pada industri pakan udang global saat ini mencakup diversifikasi bahan baku fungsional dan penggunaan aditif mutakhir guna memastikan pertumbuhan udang yang optimal serta ramah lingkungan (Rajput et al., 2025). Kapasitas pasokan yang andal dan berkelanjutan dari industri pendukung ini menjadi faktor determinan yang mempertahankan posisi tawar komoditas udang di pasar internasional, sekaligus menuntut sistem pembenihan di hulu untuk mampu menyuplai benur secara kontinu.

Kendati menawarkan potensi ekonomi yang sangat menjanjikan, pertumbuhan industri akuakultur udang global senantiasa dibayangi oleh berbagai tantangan struktural yang berisiko mengganggu stabilitas pasar. Wabah penyakit yang bersifat destruktif, hambatan regulasi lingkungan yang kian ketat, serta eskalasi biaya input produksi—terutama pakan dan energi—menjadi faktor pembatas utama yang mengancam keberlangsungan usaha ini (salous et al., 2025). Apabila tantangan-tantangan ini tidak dimitigasi melalui pendekatan teknologi yang komprehensif, maka volatilitas harga dan kelangkaan pasokan di pasar global tidak dapat dihindarkan. Di sinilah letak relevansi dari pengembangan bioteknologi reproduksi, yang dirancang secara ilmiah untuk menghasilkan galur induk dan benur yang memiliki ketahanan superior

terhadap penyakit serta efisiensi pakan yang tinggi demi menjaga daya saing ekonomi makro (salous et al., 2025).

1.1.2 Penyedia Sumber Protein Dunia dan Ketahanan Pangan

Di tingkat global, urgensi akuakultur udang tidak hanya diukur dari perspektif moneter dan perdagangan semata, melainkan juga dari kontribusi vitalnya dalam memperkuat pilar ketahanan pangan dunia (*global food security*). Sebagai bahan pangan asal laut (*seafood*), udang diakui secara luas sebagai sumber protein hewani berkualitas tinggi yang krusial untuk memenuhi kebutuhan gizi populasi manusia yang terus bertambah (salous et al., 2025). Selain kandungan asam amino esensial yang lengkap, daging udang kaya akan asam lemak tidak jenuh jamak, termasuk asam lemak omega-3, vitamin esensial, dan mineral penting yang berperan aktif dalam menurunkan risiko penyakit kardiovaskular serta mendukung perkembangan kognitif manusia. Dengan demikian, keberadaan industri ini secara langsung ikut mengintervensi perbaikan kualitas gizi masyarakat dunia dan mengatasi masalah malnutrisi global (salous et al., 2025).

Ketergantungan global pada protein laut sebelumnya sangat bertumpu pada sektor perikanan tangkap, namun fenomena eksploitasi berlebih (*overfishing*) dan perubahan iklim global telah menyebabkan stagnasi bahkan penurunan stok alami di lautan. Dalam konteks ini, akuakultur udang hadir sebagai solusi substitutif yang paling rasional untuk menjamin ketersediaan pasokan protein laut tanpa merusak ekosistem perairan alami secara masif (salous et al., 2025). Agar kontribusi ini dapat berjalan secara berkelanjutan, efisiensi konversi pakan menjadi biomassa daging udang terus ditingkatkan melalui riset nutrisi fungsional yang intensif. Integrasi antara manajemen nutrisi yang presisi dan pengelolaan kualitas air di tambak menjadi determinan utama dalam menghasilkan produk udang yang aman, sehat, dan bebas dari residu kimia berbahaya bagi konsumen global (Rajput et al., 2025).

Namun, pemenuhan peran udang sebagai penyedia protein dunia ini menghadapi hambatan besar apabila

ketersediaan benih udang (benur) berkualitas tidak dapat dijamin sepanjang tahun. Gangguan pada siklus reproduksi induk di pembenihan akibat cekaman lingkungan atau infeksi patogen dapat memutus rantai pasokan protein ini secara mendadak ke tingkat pembudidaya tambak (salous et al., 2025). Oleh sebab itu, akselerasi penerapan teknologi reproduksi menjadi mutlak diperlukan agar proses domestikasi dan pematangan gonad udang dapat dikontrol secara ilmiah, sehingga menjamin kontinuitas produksi daging udang sebagai komoditas pangan esensial dunia yang tangguh terhadap krisis pangan masa depan.

1.1.3 Dampak Sosial-Ekonomi dan Kesejahteraan Pembudidaya

Efek eksternalitas positif dari industri akuakultur udang menyentuh dimensi sosial yang sangat mendasar, terutama dalam penyediaan lapangan kerja bagi jutaan manusia di seluruh dunia. Sektor ini bersifat padat karya dan mampu menyerap tenaga kerja dalam jumlah besar, mulai dari subsistem hulu di pembenihan (*hatchery*), pembesaran di tambak, industri pengolahan pakan, hingga sektor hilir seperti pabrik pembekuan dan logistik ekspor (salous et al., 2025). Di wilayah pedesaan pesisir, khususnya di benua Asia yang menjadi episentrum budidaya udang global, industri ini bertindak sebagai motor penggerak utama pembangunan daerah. Aktivitas ekonomi yang berputar di sekitar tambak udang berhasil menahan laju urbanisasi, merangsang tumbuhnya infrastruktur lokal, dan menghidupkan sektor-sektor usaha mikro di sekitarnya (salous et al., 2025).

Melalui penyerapan tenaga kerja yang masif dan penciptaan peluang usaha baru, akuakultur udang berkontribusi secara nyata dalam program pengentasan kemiskinan dan peningkatan kesejahteraan hidup para pembudidaya tradisional. Transformasi teknologi dari metode ekstensif tradisional ke metode semi-intensif atau intensif memberikan ruang bagi peningkatan pendapatan riil masyarakat pesisir secara signifikan (salous et al., 2025). Keberhasilan finansial dari budidaya udang ini pada gilirannya meningkatkan akses keluarga pembudidaya terhadap fasilitas pendidikan yang lebih baik, layanan kesehatan

yang memadai, serta investasi sosial lainnya. Indikator-indikator kesejahteraan ini menunjukkan bahwa udang bukan sekadar entitas biologis atau komoditas dagang belaka, melainkan instrumen perubahan sosial yang mengangkat derajat ekonomi komunitas lokal.

Terlepas dari dampak positif tersebut, komunitas pembudidaya udang, terutama skala kecil, berada pada posisi yang sangat rentan terhadap kegagalan panen yang disebabkan oleh dinamika lingkungan dan serangan penyakit mendadak. Kerugian finansial akibat kematian massal udang di tambak sering kali berdampak sistemik terhadap kondisi sosial-ekonomi petambak, memicu jeratan utang, hingga pemutusan hubungan kerja massal di industri pendukung (salous et al., 2025). Untuk melindungi stabilitas sosial-ekonomi masyarakat pesisir ini, intervensi sains dan teknologi di bidang bioteknologi reproduksi menjadi pilar proteksi yang krusial. Melalui penyediaan benih yang unggul, tangguh, dan memiliki laju pertumbuhan yang cepat, risiko kegagalan budidaya dapat ditekan serendah mungkin, sehingga pendapatan petambak menjadi lebih terprediksi dan kesejahteraan sosial mereka dapat terjaga secara berkelanjutan (Rajput et al., 2025).

1.2 Pengertian dan Ruang Lingkup Bioteknologi Reproduksi Udang

Bioteknologi reproduksi pada komoditas udang didefinisikan sebagai suatu cabang ilmu terapan yang mengintegrasikan prinsip-prinsip biologi sel, molekuler, genetika, dan endokrinologi dengan rekayasa teknologi untuk memanipulasi serta mengoptimalkan seluruh proses reproduksi pada organisme krustasea. Ruang lingkup keilmuan ini tidak hanya terbatas pada upaya peningkatan fekunditas dan derajat penetasan telur di panti pembenihan (*hatchery*), melainkan mencakup pengendalian ekspresi gen, pelestarian plasma nutfah, kontrol determinasi jenis kelamin, hingga rekayasa fenotipe unggul. Aplikasi teknologi ini menjadi jembatan krusial dalam mentransformasi sektor akuakultur konvensional yang bersifat spekulatif dan bergantung pada alam menjadi sebuah industri

modern yang terukur, dapat diprediksi, dan berbasis sains (Fadjar et al., 2025).

Pemahaman mendalam mengenai batasan dan definisi bioteknologi reproduksi ini sangat penting mengingat karakteristik biologis udang, khususnya dari golongan dekapoda, memiliki sistem neuroendokrin yang sangat kompleks dan sensitif terhadap perubahan lingkungan. Intervensi teknologi dalam domain ini diarahkan untuk memecahkan hambatan-hambatan biologis utama dalam budidaya, seperti kegagalan matang gonad dalam kondisi penangkaran, sinkronisasi pemijahan yang rendah, serta penurunan mutu genetik akibat perkawinan sekerabat (*inbreeding*). Melalui pendekatan interdisipliner, bioteknologi reproduksi menyediakan perangkat metodologis untuk mengontrol sumbu hipotalamus-hipofisis-gonad versi krustasea (yaitu kompleks organ-X/organ-Y dan kelenjar sinus) guna merekayasa performa reproduksi secara presisi dan berkelanjutan (Fadjar et al., 2025).

1.2.1 Evolusi dari Metode Konvensional ke Pendekatan Modern

Secara historis, perkembangan teknologi reproduksi udang ditandai oleh ketergantungan yang sangat tinggi pada metode konvensional mekanis, di mana teknik ablasi tangkai mata (*eyestalk ablation*) menjadi motor penggerak utama operasional pembenihan komersial selama beberapa dekade. Metode ablasi ini dilakukan dengan cara merusak atau memotong salah satu tangkai mata udang betina dengan tujuan mengeliminasi organ-X dan kelenjar sinus yang memproduksi *Gonad-Inhibiting Hormone* (GIH) atau *Vitellogenesis-Inhibiting Hormone* (VIH). Penurunan titer hormon penghambat tersebut secara drastis di dalam hemolinf akan menstimulasi organ target untuk mempercepat proses vitelogenesis dan pematangan ovarium secara masif, meskipun udang berada dalam lingkungan budidaya yang sub-optimal (Fadjar et al., 2025).

Kendati terbukti efektif dalam memicu pematangan ovarium secara cepat dan instan, metode ablasi tangkai mata ekstrem ini mulai menghadapi penolakan global yang masif karena bertentangan dengan prinsip kesejahteraan hewan (*animal welfare*) dan memicu degradasi kualitas biologis benur.

Tindakan invasif ini menyebabkan cekaman fisiologis berat, mengganggu sistem osmoregulasi, memperpendek masa produktif induk, serta menurunkan kualitas telur dan larva yang dihasilkan pada siklus-siklus berikutnya. Melalui analisis transkriptomik mutakhir, para ilmuwan kini mulai berhasil mengelusidasi mekanisme molekuler di balik dampak negatif ablasi tersebut, yang menunjukkan terjadinya disregulasi masif pada jalur metabolisme energi dan sistem imunitas tubuh udang, sehingga menegaskan urgensi untuk segera beralih ke metode alternatif yang non-invasif (Fadjar et al., 2025).

1.2.2 Aplikasi Manipulasi Hormonal Eksogen

Sebagai substitusi langsung terhadap metode ablasi fisik, perkembangan bioteknologi modern mengarah pada pemanfaatan teknik manipulasi hormonal eksogen yang jauh lebih aman dan ilmiah. Pendekatan ini dilakukan dengan mengidentifikasi, mengisolasi, dan menyintesis senyawa-senyawa hormon spesifik—seperti estrogen, progesteron, serta *Gonadotropin-Releasing Hormone* (GnRH)—untuk kemudian diinjeksikan atau disuplementasikan melalui pakan ke tubuh induk udang. Intervensi hormonal ini bekerja secara mimetik untuk meniru sinyal biokimia alami yang merangsang sekresi hormon pengendali pematangan ovarium (*Vitellogenesis-Stimulating Hormone* / VSH), sehingga proses pematangan gonad dapat berjalan secara fisiologis tanpa perlu merusak organ sensorik udang (Hidir et al., 2025).

Keunggulan utama dari teknologi manipulasi endokrin ini adalah kemampuannya untuk mengontrol waktu pemijahan secara lebih presisi dengan tingkat mortalitas induk yang mendekati nol persen. Selain hormon steroid dan peptida, riset mutakhir juga mulai mengeksplorasi peran neurotransmitter seperti serotonin (5-hidroksitriptamin) dan dopamin dalam memodulasi pelepasan neurohormon dari ganglia saraf udang. Dengan merekayasa rasio dan waktu paparan senyawa-senyawa biokimia ini, panti pembenihan dapat mencapai standardisasi produksi benur berkualitas tinggi secara massal tanpa harus mengorbankan status kesehatan dan imunitas dari induk udang yang berharga (Hidir et al., 2025).

1.2.3 Intervensi Genetik Molekuler: RNAi dan CRISPR/Cas9

Lompatan teknologi paling revolusioner dalam ruang lingkup bioteknologi reproduksi udang ditunjukkan oleh integrasi alat-alat genetika molekuler tingkat lanjut, khususnya teknologi *RNA interference* (RNAi) dan penyuntingan genom (*gene editing*). Teknologi RNAi diaplikasikan sebagai metode pembungkaman gen (*gene silencing*) yang sangat spesifik, di mana untai ganda RNA (*double-stranded RNA* / dsRNA) dirancang khusus untuk mendegradasi mRNA target yang menyandikan hormon penghambat matang gonad (GIH). Melalui penekanan ekspresi gen GIH pada tingkat pasca-transkripsi ini, sintesis hormon penghambat dapat ditekan secara temporer, sehingga memicu pematangan ovarium alami tanpa menyebabkan trauma fisik maupun kerusakan permanen pada sistem neuroendokrin udang (Ren et al., 2024).

Di sisi lain, adopsi sistem CRISPR/Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) membuka cakrawala baru dalam modifikasi genom krustasea secara permanen dan presisi demi memunculkan sifat-sifat produksi yang unggul. Melalui rekayasa genetika ini, para peneliti dapat memotong, menyisipkan, atau mengganti sekuens DNA spesifik yang bertanggung jawab terhadap kontrol pertumbuhan, fekunditas, dan resistensi terhadap patogen virus maupun bakteri. Efisiensi tinggi yang ditawarkan oleh teknologi CRISPR/Cas9 memungkinkan pembentukan galur induk unggul baru dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan dengan metode seleksi fenotipe konvensional, sekaligus meminimalkan jejak ekologis negatif akibat pelepasan limbah akuakultur ke lingkungan sekitar (Ren et al., 2024).

1.2.4 Kriopreservasi Sperma dan Teknologi Populasi Monoseks

Aspek krusial berikutnya dalam ruang lingkup bioteknologi reproduksi udang adalah pengembangan teknik kriopreservasi sperma (*sperm cryopreservation*), yang berfungsi sebagai pilar utama dalam program pemuliaan biakan (*breeding program*) modern dan bank gen. Kriopreservasi memungkinkan penyimpanan spermatofor atau suspensi spermatozoa udang

jantan berkualitas tinggi dalam jangka waktu yang tidak terbatas menggunakan nitrogen cair pada suhu ekstrim. Meskipun teknologi ini menawarkan keuntungan besar dalam hal efisiensi efektivitas logistik perkawinan silang, tantangan biologis yang kompleks masih dihadapi oleh para ilmuwan, terutama dalam merumuskan protokol krioprotektan (*cryoprotectant*) yang ideal yang mampu menjaga integritas membran sel sperma serta menjamin viabilitas dan viabilitas reproduksi larva yang menetas dari hasil fertilisasi buatan tersebut (Haagen & Blackburn, 2024).

Selain preservasi gamet, manipulasi pada level endokrin dan genetik juga diarahkan untuk memproduksi populasi monoseks (*monosex population*), sebuah strategi yang terbukti memberikan keuntungan ekonomi eksponensial pada spesies krustasea tertentu seperti udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*). Industri budidaya sangat diuntungkan oleh populasi tunggal kelamin—baik seluruhnya jantan maupun seluruhnya betina—karena adanya fenomena dimorfisme pertumbuhan, di mana salah satu jenis kelamin memiliki laju pertumbuhan dan konversi pakan yang jauh lebih superior dibandingkan jenis kelamin lainnya. Melalui manipulasi kelenjar androgenik (*androgenic gland*) atau intervensi genomik fungsional, diferensiasi seksual udang dapat diarahkan sepenuhnya sejak fase larva, sehingga mengoptimalkan efisiensi pemanenan dan menyeragamkan ukuran produk akhir di pasar (Wahl et al., 2023).

1.2.5 Integrasi Sistem Akuakultur dan Perspektif Keberlanjutan Global

Dalam perkembangannya yang paling mutakhir, ruang lingkup bioteknologi reproduksi udang tidak lagi dipelajari secara terisolasi di laboratorium, melainkan mulai diintegrasikan ke dalam sistem budidaya yang lebih makro dan holistik, seperti sistem Akuakultur *Multi-Trof Terintegrasi* (*Integrated Multi-Trophic Aquaculture/ IMTA*). Penerapan IMTA yang menggabungkan budidaya udang dengan organisme dari tingkat trofik berbeda (seperti rumput laut dan avertebrata pemakan detritus) dirancang untuk menciptakan ekosistem budidaya yang sirkular dan minim limbah. Namun, transisi

menuju sistem terintegrasi ini menyisakan celah pengetahuan (*knowledge gaps*) yang besar mengenai bagaimana dinamika kualitas air dan interaksi antar-spesies dalam IMTA memengaruhi biologi reproduksi, sekresi hormon, dan kualitas gamet dari udang yang dipelihara (Urzúa & Gebert, 2025).

Secara aksiologis, lanskap bioteknologi reproduksi udang terus mengalami ekspansi konseptual yang dinamis seiring dengan meningkatnya tekanan global terhadap isu ketahanan pangan dan kelestarian lingkungan. Kolaborasi riset yang bersifat interdisipliner—menghubungkan para ahli fisiologi hewan, ahli bioinformatika, insinyur akuakultur, hingga pakar sosio-ekonomi—menjadi prasyarat mutlak untuk melahirkan metodologi pembenihan yang aplikatif di tingkat industri. Optimalisasi teknik pembiakan mutakhir yang dipandu oleh sains ini pada akhirnya mengemban misi suci: memastikan pasokan benur berkualitas tinggi tersedia secara konsisten sepanjang tahun guna menopang produksi pangan global tanpa mendegradasi daya dukung ekosistem bumi (Fadjar et al., 2025).

1.3 Urgensi Produksi Benih Udang Berkelanjutan (*Sustainable Seed Production*)

Urgensi mengenai produksi benih udang yang berkelanjutan (*sustainable seed production*) kini menjadi episentrum pembahasan dalam diskursus akuakultur modern karena perannya sebagai penentu utama viabilitas ekonomi dan stabilitas ekologis sektor ini. Di tengah fluktuasi pasar global dan tantangan perubahan lingkungan yang kian tidak menentu, keberlanjutan industri udang tidak dapat lagi bertumpu pada metode konvensional yang bersifat eksploitatif terhadap alam. Transformasi struktural menuju sistem produksi yang terukur dan mandiri mutlak diperlukan guna menjamin pasokan benih berkualitas tinggi secara kontinu demi menjaga efisiensi operasional di tingkat petambak (Goebel et al., 2025). Oleh karena itu, investasi ilmiah pada ranah bioteknologi reproduksi diarahkan secara masif untuk memecahkan hambatan di panti pembenihan, yang pada akhirnya akan menentukan masa depan ketahanan pangan berbasis komoditas laut ini (Singhania, 2025).

1.3.1 Tantangan *Broodstock* (Induk) dari Alam

Secara historis, industri pembenihan udang global memiliki ketergantungan yang sangat tinggi terhadap pasokan induk (*broodstock*) yang ditangkap langsung dari habitat alami di laut lepas. Ketergantungan kronis ini kini menghadapi jalan buntu akibat terjadinya penurunan kualitas genetik yang signifikan pada populasi udang liar akibat tekanan penangkapan berlebih (*overfishing*) dan degradasi lingkungan pesisir. Fenomena penurunan heterozigositas dan hilangnya alel-alel unggul pada induk alam menyebabkan penurunan performa reproduksi yang drastis ketika diadaptasikan di lingkungan pembenihan, yang berdampak langsung pada rendahnya derajat kelangsungan hidup larva yang dihasilkan (Jumain et al., 2025).

Selain penurunan mutu genetik, ketergantungan pada alam memicu masalah kritis berupa kelangkaan pasokan induk yang telah matang gonad secara alami di laut. Fluktuasi musiman yang ekstrem dan kerusakan ekosistem terumbu karang serta estuari sebagai daerah asuhan (*nursery ground*) udang membuat para pelaku industri pembenihan kesulitan untuk memprediksi ketersediaan induk berkualitas tinggi sepanjang tahun. Studi empiris di berbagai sentra akuakultur, seperti di Malaysia dan Bali, menegaskan bahwa tanpa adanya tata kelola manajemen induk yang berbasis pada seleksi genetik yang ketat dan manipulasi lingkungan yang presisi, kegagalan pematangan gonad dan kegagalan reproduksi pada tingkat penangkaran akan terus berulang (Maolana & Muahiddah, 2024).

Tantangan yang tidak kalah destruktif dari penggunaan induk asal alam adalah tingginya risiko membawa agen penyakit berbahaya atau patogen secara vertikal ke fasilitas pembenihan. Induk yang ditangkap dari alam liar sering kali bertindak sebagai pembawa gejala tak bergejala (*asymptomatic carrier*) bagi berbagai jenis virus mematikan, seperti *White Spot Syndrome Virus* (WSSV) dan *Infectious Hypodermal and Hematopoietic Necrosis Virus* (IHHNV), serta bakteri patogen pemicu *Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease* (AHPND). Ketika induk-induk tersebut mengalami cekaman fisiologis selama proses transportasi dan adaptasi di *hatchery*, patogen tersebut akan mengalami reaktivasi dan ditularkan langsung kepada telur serta

larva, yang memicu kontaminasi sistemik pada seluruh fasilitas pembenihan (Jumain et al., 2025).

1.3.2 Ancaman Penyakit dan Kegagalan *Hatchery*

Dampak dari kontaminasi patogen dan rendahnya mutu biologis induk alam berujung pada tingginya kerentanan panti pembenihan terhadap serangan wabah penyakit mendadak yang memicu kegagalan produksi skala besar. Fluktuasi kualitas dan kuantitas benih udang (benur) yang dihasilkan oleh *hatchery* yang tidak menerapkan biosekuriti berbasis bioteknologi dapat meruntuhkan seluruh siklus budidaya yang telah direncanakan di tambak pembesaran. Ketika petambak menebar benur dengan kualitas biologis yang rendah dan membawa bawaan patogen latent, risiko kematian massal pada fase awal pemeliharaan (*Early Mortality Syndrome*) meningkat secara eksponensial, yang berimplikasi pada kerugian finansial bernilai miliaran rupiah (Pradipkumar et al., 2025).

Ketidakstabilan pasokan benur, baik dalam konteks kelangkaan jumlah maupun penurunan performa pertumbuhan, mengacaukan manajemen kalender tanam dan rantai pasok industri hilir seperti pabrik pengolahan udang ekspor. Ketidakpastian ini diperparah oleh eskalasi biaya input produksi yang terus membubung tinggi, terutama biaya pakan fungsional dan tata kelola energi untuk sistem aerasi serta pemanas air. Kombinasi antara tingginya biaya operasional dan tingginya risiko kegagalan panen akibat benur yang membawa penyakit menciptakan barier ekonomi yang berat bagi pembudidaya, terutama pembudidaya skala kecil yang memiliki keterbatasan modal untuk melakukan pemulihan usaha (Pradipkumar et al., 2025).

Kompleksitas tantangan di panti pembenihan kini semakin diperumit oleh manifestasi perubahan iklim global yang mengganggu stabilitas parameter oseanografi dan kualitas air laut sebagai media utama pemeliharaan. Kenaikan suhu air laut rata-rata, fluktuasi salinitas yang ekstrem akibat anomali cuaca, serta fenomena asidifikasi laut secara langsung mengintervensi sistem neuroendokrin dan fisiologi reproduksi induk udang, sehingga menurunkan efisiensi sintesis vitelogenin. Oleh karena

itu, formulasi strategi yang integratif dan adaptif terhadap perubahan iklim menjadi agenda riset mendesak guna membangun ketahanan ekologis pada sistem pembenihan modern agar tidak mudah mengalami kolaps fungsional (Siddique et al., 2025).

1.3.3 Konsep Keberlanjutan melalui Kemandirian *Hatchery*

Menghadapi spektrum tantangan yang multidimensi tersebut, pergeseran paradigma menuju konsep kemandirian pembenihan (*hatchery independence*) menjadi harga mati yang tidak dapat ditawar lagi bagi keberlanjutan industri akuakultur udang modern. Kemandirian ini diwujudkan melalui program domestikasi total dan pemuliaan selektif (*selective breeding*) jangka panjang guna memutus ketergantungan pada stok induk alam liar. Melalui integrasi evaluasi nilai pemuliaan genetik, spesies udang komersial utama seperti Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) dan Udang Windu (*Penaeus monodon*) dapat direkayasa untuk memiliki karakter reproduksi yang unggul, fekunditas yang tinggi, serta laju pertumbuhan pasca-larva yang cepat dan seragam (Gustinda, 2024; Harvinda et al., 2025; Larasati et al., 2021; Hukuban et al., 2025; Pramono et al., 2025; Pratomo et al., 2025; Putri Kania Mardika et al., 2025)(Yu et al., 2026).

Pilar utama dari kemandirian *hatchery* modern adalah kapasitasnya untuk memproduksi benih udang yang menyanggah status bebas patogen spesifik (*Specific Pathogen Free / SPF*) secara konsisten dan massal. Pembenihan berbasis SPF menjamin bahwa benur yang didistribusikan ke petambak memiliki tingkat kebersihan biologis yang tinggi dari patogen-patogen mayor yang meregulasi kedaruratan akuakultur internasional. Keberhasilan produksi benur SPF ini ditopang kuat oleh aplikasi bioteknologi nutrisi modern, termasuk penggunaan aditif pakan fungsional, imunostimulan, dan probiotik generasi terbaru yang secara signifikan meningkatkan status kesehatan, efisiensi konversi pakan, serta sistem kekebalan tubuh bawaan (*innate immunity*) dari larva udang sejak dini (Pradipkumar et al., 2025; Larasati et al., 2026).

Pada masa depan, akselerasi capaian genetik untuk memperkuat konsep keberlanjutan ini akan sangat bertumpu pada adopsi perangkat bioteknologi molekuler tingkat lanjut, seperti seleksi berbasis genomik (*genomic selection*) dan alat penyuntingan genom presisi tinggi seperti sistem CRISPR/Cas9. Intervensi teknologi mutakhir ini memungkinkan identifikasi marka molekuler yang berkaitan dengan sifat ketahanan terhadap penyakit tertentu (*Specific Pathogen Resistant / SPR*) dan toleransi terhadap cekaman lingkungan seperti salinitas rendah atau hipoksia. Melalui integrasi presisi sains genetik ini, panti pembenihan tidak hanya sekadar mandiri dalam hal kuantitas, melainkan mampu menjadi motor penggerak stabilitas ekologis dan kelayakan ekonomi industri akuakultur global dalam menghadapi tantangan pasar internasional yang kompetitif (Garcia et al., 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Fadjar, M., Hariani, D., Amrillah, A. M., & Hadiana. (2025). Enhancement of Gonadal Maturity in Female Sand Lobster *Panulirus homarus* Using Shortwave Radiation Beams (Laser Puncture). *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(5), 2193–2216. <https://doi.org/10.21608/EJABF.2025.424482.6593>
- Garcia, B. F., Mastrochirico-Filho, V. A., Gallardo-Hidalgo, J., Campos-Montes, G. R., Medrano-Mendoza, T., Rivero-Martínez, P. V., Caballero-Zamora, A., Hashimoto, D. T., & Yáñez, J. M. (2024). A high-density linkage map and sex-determination loci in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *BMC Genomics* 2024 25:1, 25(1), 565-. <https://doi.org/10.1186/S12864-024-10431-X>
- Goebel, A., Henriksson, P. J. G., Milner-Gulland, E. J., Travers, H., & Poore, J. (2025). *A Critical Review of Life Cycle Assessment in Shrimp Aquaculture: Uncovering Methodological Dominance and Analytical Blind Spots*. <https://doi.org/10.31223/X5HJ0K>
- Gustinda, L. L. (2024). POTENTIAL OF ADDITION OF CALCIUM HYDROXIDE FROM CHICKEN EGG SHELLS TO FEED CONVERSION RATIO AND FEED EFFICIENCY ON CULTIVATION OF WHITE SHRIMP (*LITOPENAEUS VANNAMEI*) IN FRESHWATER CONDITIONS. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*, 145(1), 95–101. <https://doi.org/10.18551/RJOAS.2024-01.13>
- Haagen, I., & Blackburn, H. (2024). Efforts to cryopreserve shrimp (Penaeid) genetic resources and the potential for a shrimp germplasm bank in the United States. *Aquaculture*, 580, 740298. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2023.740298>
- Harvinda, Y., Sukardi, P., Anjani, J., Kusuma, B., Setyaningsih, L., Nurhabib, A., Murti Sujadi, F., Dewi, R., Gustinda Larasati, L., Rahmayanti, A., Magister Sumber Daya Akuatik, P., Jenderal Soedirman, U., & Ilmu Kelautan, P. (2025).

PENGUATAN PERAN POKMASWAS MELALUI PELATIHAN RESTOCKING IKAN NILEM (*Osteochilus hasselti*) DI DESA CILOPADANG, KABUPATEN CILACAP. *SULUH: Jurnal Abdimas*, 7(1), 106–118. <https://doi.org/10.35814/SULUH.V7I1.9061>

Hidir, A., Aaqillah-Amr, M. A., Baiduri, S. N., Aina Liyana, N. M. A., Ma, H., & Ikhwanuddin, M. (2025). Evaluating Fertilization Control and Reproductive Manipulation Techniques for Enhancing Crustacean Reproductive Performance: A Review. *Reviews in Aquaculture*, 17(4), e70070. <https://doi.org/10.1111/RAQ.70070>;WGROU:STRING: PUBLICATION

Jumain, N. A., Ali, F., Sharifuddin, J., Naw, N. M., & Chong, C. M. (2025). BROODSTOCKS SELECTION PRACTICES AMONG HATCHERIES IN PENINSULAR MALAYSIA. *ADVANCED INTERNATIONAL JOURNAL OF BUSINESS, ENTREPRENEURSHIP AND SME'S (AIJBES)*, 7(26), 440–456. <https://doi.org/10.35631/AIJBES.726030>

Larasati, L. G., Nimitkul, S., & Dewi, N. N. (2021). The effects of various doses of probiotics on growth and survival rates of white shrimp larva (*Litopenaeus vannamei*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 718(1), 012097. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/718/1/012097>

Maolana, A., & Muahiddah, N. (2024). Management of Broodstock for Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) at the Center for Superior Shrimp and Shellfish Broodstock Production (BPIU2K) Karangasem, Bali. *Journal of Fish Health*, 4(3), 98–105. <https://doi.org/10.29303/JFH.V4I3.5724>

POTENSI DAN PENGELOLAAN PERAIRAN DI MALUKU - Ronald Darlly Hukubun, Imanuel VillianTrayanta Soukotta, Nunun Ainun Putri Sari Banun Kaliky, Tahir Tuasikal, Suardi Laheng, Jahra Wasahua, Muhammad Fahrul Barcinta, Lorichika Gustinda Larasati, Ina Budhiarti (n.d.). Retrieved April 7, 2026, from <https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=y22VEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=info:i3whuiezRaEj:scholar>

.google.com&ots=9EF-

j23zu5&sig=ID1SbJ7EnYLWPWBUPzgFMcfc8VM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- Pradiptkumar, V., Krishna, B., & Kumar, V. P. (2025). Sustainable Cultivation of Vannamei Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Using Innovative Feed Additives. *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*, 2(6), 208–216. [https://doi.org/10.59324/EJEB.A.2025.2\(6\).19](https://doi.org/10.59324/EJEB.A.2025.2(6).19)
- Pramono, T. B., Larasati, L. G., Kasprijo, K., Soedibya, P. H. T., Fahrury, Z. H., & Davananda, A. H. (2025). Molecular Confirmation of *Barbonymus balleroides* Identity from the Serayu River Basin, Indonesia, Using Mitochondrial *coi* Gene Analysis. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(6), 2631–2638. <https://doi.org/10.21608/EJABF.2025.433155.6804>
- Pratomo, H., Pramono, T. B., Larasati, L. G., Fikriyya, N., Susilo, A., & Abdullah, F. (2025). Integrative Taxonomic Approach for the Identification and Genetic Characterization of *Mystus singaringan* from the Serayu River Basin, Central Java, Indonesia. *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, 29(5), 443–454. <https://doi.org/10.21608/EJABF.2025.412546.6388>
- Putri Kania Mardika, H., Budhi Pramono, T., Nurul Afiyah, N., Johanda Putra, J., Gustinda Larasati, L., Nur Rohmah, S., Program Studi Akuakultur, D., Perikanan dan Ilmu Kelautan, F., Jenderal Soedirman Purwokerto Jl Soeparno, U., GOR Soesilo Soedarman Purwokerto, K., Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, D., & Program Studi Akuakultur, M. (2025). Utilization of Mangosteen Extract to Enhance the Masculinization of Striped Snakehead (*Channa striata*) Fingerlings. *Barakuda 45: Jurnal Ilmu Perikanan Dan Kelautan*, 7(2), 169–180. <https://doi.org/10.47685/BARAKUDA45.V7I2.690>
- Rajput Y. V. 1, L. C. D. 2. D. B. A. . (n.d.). *The Global Shrimp Feed Industry: Current Status, Challenges, and Future Directions*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.17279689>
- Ren, S., Yáñez, J. M., Perez-Enriquez, R., Rye, M., Houston, R. D., Hurwood, D. A., Gonzalez-Galaviz, J. R., Salazar, M., & Jerry,

D. R. (2024). 100 years domestication of penaeid shrimp and meta-analysis of breeding traits. *BioRxiv*, 2024.06.22.600213.

<https://doi.org/10.1101/2024.06.22.600213>

Reproduksi Udang dalam Sistem Akuakultur - Lorichika Gustinda Larasati, Aditya Putra Basir, Muhammad Fatratullah Muhsin, Nanda Diniarti, Tholibah Mujtahidah, Besse Tenri Nurkamillah, Hanisya Putri Kania Mardika, Petrus Lapu, Ria Retno, Nunun Ainun Putri S.... (n.d.). Retrieved June 27, 2026,

from https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=Bi3kEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=info:4yrxPJQ4VMMJ:scholar.google.com&ots=RxcNBK4nKc&sig=a4qZpxDQf7Mudk1DC-pjpxh1sBA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

salous, A. É., Diwakar, D. A., Gudgila, D. R. D., Pradhan, D. D., Patil, D. M., & Roy, S. (2025). The Role Of Aquaculture In Global Nutrition And Economic Development: A Long Research Article On Challenges, Opportunities, And Future Directions. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(24), 4729–4735.

<https://doi.org/10.64252/DCE6SV76>

Siddique, M. A. B., Ahmed, I., Mahalder, B., Haque, M. M., & Ahammad, A. K. S. (2025). Integrated Strategies for Broodstock Management and Seed Production to Mitigate Climate and Water-Quality Challenges: A Critical and Meta-Analysis Review. *Aquaculture, Fish and Fisheries*, 5(6), e70158.

<https://doi.org/10.1002/AFF2.70158>;JOURNAL:JOURNAL:26938847;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER

SINGHANIA, A. (2025). From Pond to Plate: Sustainability Concerns of Global Shrimp Cultivation, Logistics, and Economy, with Reflections on Eastern Indian Aquaculture. *IJFMR - International Journal For Multidisciplinary Research*, 7(5).

<https://doi.org/10.36948/IJFMR.2025.V07I05.55182>

Thi Huong Giang, N., Thanh Tu, T., Van Kiet Junior, V., & High School, S. (2025). Promoting the Export of Shrimp Products from Kien Giang – Vietnam toward Sustainable

- Development. *International Journal of Scientific Research and Management (IJSRM)*, 13(10), 9898–9917. <https://doi.org/10.18535/IJSRM/V13I10.EM08>
- Urzúa, Á., & Gebert, M. (2025). Exploring the Potential of European Brown Shrimp (*Crangon crangon*) in Integrated Multi-Trophic Aquaculture: Towards Achieving Sustainable and Diversified Coastal Systems. *Oceans 2025*, Vol. 6, Page 47, 6(3), 47. <https://doi.org/10.3390/OCEANS6030047>
- Wahl, M., Levy, T., Ventura, T., & Sagi, A. (2023). Monosex Populations of the Giant Freshwater Prawn *Macrobrachium rosenbergii*—From a Pre-Molecular Start to the Next Generation Era. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(24), 17433. <https://doi.org/10.3390/IJMS242417433/S1>
- Yu, J., Kong, J., Luan, S., Cao, J., Liu, M., Luo, K., Tan, J., Dai, P., Wang, Z., Sui, J., & Meng, X. (2026). Two-Generation Genetic Evaluation of Female Reproductive Performance in Pacific White Shrimp (*Penaeus vannamei*) Under SPF Conditions. *Animals 2026*, Vol. 16, Page 235, 16(2), 235. <https://doi.org/10.3390/ANI16020235>

BAB 2

BIOLOGI REPRODUKSI UDANG SEBAGAI DASAR BIOTEKNOLOGI

2.1 Anatomi dan Histologi Sistem Reproduksi Komparatif

2.1.1 Diferensiasi Morfologi Organ Reproduksi Jantan dan Betina

Pendekatan fungsional dalam bioteknologi reproduksi krustasea, khususnya udang penaeid, memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai fisiologi komparatif dan dimorfisme seksual sekunder. Dimorfisme seksual pada udang penaeid tidak hanya mencakup perbedaan ukuran tubuh eksternal, tetapi juga melibatkan diferensiasi fungsional yang ekstrem pada struktur appendages dan organ internal. Secara evolusioner, diferensiasi ini dikendalikan oleh interaksi genetis yang kompleks dan sekresi hormonal yang mengatur jalur somatik serta reproduktif sejak fase juvenil dini. Pemahaman komprehensif mengenai karakteristik makrostruktur ini menjadi fondasi utama dalam memanipulasi keberhasilan pemijahan di fasilitas pembenihan komersial (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Pada tingkat makro, perbedaan morfologi luar antara udang jantan dan betina dewasa dapat diidentifikasi secara visual melalui keberadaan organ kopulasi eksternal yang terletak pada bagian ventral cephalothorax dan abdomen. Udang betina dicirikan oleh keberadaan thelycum, suatu modifikasi struktural dari sternit sternal pada segmen toraks terakhir (periopod ke-5) yang berfungsi sebagai organ penerima dan penyimpanan spermatofor selama atau setelah proses kopulasi. Sebaliknya, udang jantan memiliki petasma, yang terbentuk dari modifikasi endopodit pleopod pertama (kaki renang pertama). Petasma ini berfungsi secara mekanis untuk mentransfer spermatofor dari terminal ampulla jantan ke dalam atau ke atas permukaan

thelycum betina. Karakteristik ini menunjukkan adaptasi mekanis yang sinkron demi menjamin efisiensi fertilisasi eksternal (Chen et al., 2025).

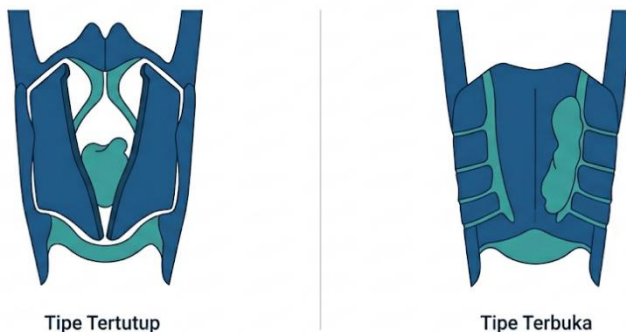
Dalam konteks bioteknologi akuakultur modern, kemampuan mendeteksi diferensiasi morfologi secara dini dan akurat memegang peranan krusial dalam manajemen seleksi induk unggul (*broodstock management*). Evaluasi visual terhadap perkembangan organ eksternal ini dikombinasikan dengan penilaian karakter morfometrik untuk memprediksi kesiapan reproduksi populasi udang di bak maturasi. Melalui pemahaman menyeluruh tentang diferensiasi morfologi ini, rekayasa lingkungan dan intervensi hormonal dapat diaplikasikan secara spesifik berdasarkan kebutuhan biologis masing-masing jenis kelamin, sehingga mampu mengoptimalkan produksi benih secara berkelanjutan dan meminimalkan tingkat mortalitas pasca-handling di hatchery (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Makrostruktur organ reproduksi internal pada udang betina terdiri atas ovarium yang berpasangan, oviduk, dan lubang genital perempuan (*female gonopore*). Ovarium udang penaeid merupakan organ bilateral yang memanjang dari wilayah anterior cephalothorax hingga ujung posterior abdomen, tepat di atas saluran pencernaan dan di bawah sinus sternal. Secara anatomis, ovarium dibagi menjadi tiga lobus utama: lobus anterior (frontal) yang terletak di dekat lambung, lobus lateral (toraks) yang mengelilingi hepatopankreas, dan lobus posterior (abdominal) yang memanjang lurus sepanjang usus hingga segmen abdomen keenam. Perluasan lobus ovarium yang masif ini mencerminkan kapasitas fekunditas udang yang tinggi, di mana ovarium dewasa mampu menampung ratusan ribu oosit yang berkembang secara sinkron atau asinkron tergantung pada karakteristik spesifik spesies (Chen et al., 2025).

Saluran oviduk pada udang betina merupakan struktur tubular tipis berselaput otot yang keluar dari bagian mid-lateral lobus toraks ovarium. Oviduk memanjang ke arah ventral dan bermuara pada gonopore betina, yang terletak di basis koksa pasangan kaki jalan ketiga (periopod ke-3). Dinding oviduk dilapisi oleh epitel kolumnar selapis yang mensekresikan mukopolisakarida pelumas untuk memfasilitasi perjalanan oosit

yang matang selama proses ovulasi menuju lingkungan eksternal. Struktur muara genital ini terintegrasi secara fungsional dengan anatomi thelycum, yang posisinya sangat berdekatan untuk memastikan spermatozoa yang dilepaskan dari spermatofor dapat langsung membuahi sel telur yang keluar dari gonopore (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Variasi arsitektur thelycum pada udang betina dibagi menjadi dua tipe utama, yaitu thelycum tertutup (*closed thelycum*) dan thelycum terbuka (*open thelycum*). Klasifikasi ini menentukan kronologi dan mekanisme kopulasi dalam siklus reproduksi. Spesies dengan thelycum tertutup, seperti *Penaeus monodon*, memiliki struktur kantung internal khusus yang dilindungi oleh lempengan sternal keras. Mating atau kopulasi pada tipe ini wajib terjadi segera setelah udang betina mengalami molting (*post-molt*), ketika kutikula masih lunak, sehingga spermatofor dapat disisipkan ke dalam kantung penyimpanan untuk disimpan dalam jangka waktu lama hingga ovarium matang. Sebaliknya, spesies dengan thelycum terbuka, seperti *Litopenaeus vannamei*, tidak memiliki kantung penyimpanan internal; thelycum mereka berupa area sternal terbuka yang rata atau sedikit beralur tempat spermatofor ditempelkan secara eksternal hanya beberapa jam sebelum proses pemijahan (*inter-molt*) terjadi (Chen et al., 2025).



Gambar 2.1. Diagram Komparatif Arsitektur Thelycum (Udang Penaeid)

Sistem reproduksi internal udang jantan terdiri dari sepasang testis, sepasang vas deferens yang memanjang, dan sepasang terminal ampulla (*ampoule*) yang bermuara pada gonopore jantan. Testis terletak di bagian dorsal cephalothorax, tepat di atas hepatopankreas dan di bawah jantung. Organ ini berbentuk sub-transparan dan berlobus banyak, di mana lobus-lobus tersebut saling terhubung oleh jembatan jaringan ikat sentral. Di dalam lobus testis inilah proses spermatogenesis awal berlangsung, menghasilkan sel sperma spermatoidal yang belum matang. Spermatogenesis di dalam testis berjalan secara kontinu setelah udang jantan mencapai kematangan seksual somatik, yang diregulasi ketat oleh hormon kelenjar androgenik (Nuraini et al., 2022).

Vas deferens merupakan saluran tubular kompleks yang berfungsi mentransfer, mematangkan, dan membungkus spermatozoa menjadi struktur spermatofor yang utuh. Secara anatomis, vas deferens dibagi menjadi tiga wilayah fungsional yang berbeda: *proximal vas deferens* (PVD), *mid vas deferens* (MVD), dan *distal vas deferens* (DVD). PVD berupa saluran sempit berliku yang menerima spermatozoa dari testis. Saat sperma bergerak menuju MVD, diameter saluran melebar dan sel-sel epitel penyusun dinding saluran mulai mensekresikan matriks gelatin dan substansi glikoprotein yang mengelompokkan spermatozoa. Di dalam DVD, matriks tersebut mengalami kondensasi dan pembentukan lapisan membran pelindung luar yang kaku, membentuk paket sperma diskret yang siap untuk diejakulasikan (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Terminal ampulla merupakan struktur muskular berbentuk kantung tebal yang terletak di ujung posterior DVD, tepat di dalam segmen toraks terakhir. Organ ini berfungsi sebagai tempat penyimpanan sementara spermatofor yang telah terbentuk sempurna sebelum proses kopulasi berlangsung. Dinding terminal ampulla kaya akan jaringan otot sirkular dan longitudinal yang peka terhadap rangsangan neurokimia, memungkinkan kontraksi secara kuat untuk mengusir (*ejaculate*) spermatofor keluar melalui gonopore jantan yang terletak di basis koksa periopod kelima (periopod ke-5). Di dekat terminal ampulla, terdapat kelenjar androgenik yang melekat

pada dinding sub-terminal, berperan penting sebagai pusat kendali sekresi hormon maskulinisasi seluruh sistem reproduksi (Nuraini et al., 2022).

Sebagai organ kopulasi eksternal jantan, petasma bertindak sebagai struktur mekanis penyalur spermatofor yang diejakulasikan oleh terminal ampulla. Petasma terbentuk dari penggabungan endopodit pasangan kaki renang pertama yang saling mengunci menggunakan struktur kait mikroskopis berupa cincinuli. Selama kopulasi, udang jantan memosisikan tubuhnya di bawah betina dan menggunakan petasma untuk menangkap spermatofor yang keluar dari gonopore-nya sendiri, kemudian mengarahkannya secara presisi ke struktur thelycum betina. Sinkronisasi pergerakan ini didukung oleh appendix masculina, sebuah struktur aksesoris pada pleopod kedua jantan yang berfungsi memperkuat cengkeraman mekanis selama transfer sperma berlangsung, menjamin efisiensi deposisi gamet jantan yang optimal (Alfaro-Montoya et al., 2026).

2.1.2 Struktur Histologis Gonad pada Berbagai Tingkat Kematangan

Ontogeni dan diferensiasi seksual dini pada fase juvenil udang penaeid merupakan proses biologis berurutan yang dimulai sejak tahap akhir larva hingga mencapai perkembangan morfometri dewasa. Selama fase Nauplius, Zoea, dan Mysis, primordia gonad belum berdiferensiasi secara morfologis dan sel germinal primordial (*primordial germ cells*) masih bermigrasi ke posisi anatomis definitif di area mesodermal dorsal. Diferensiasi seksual fungsional pertama kali diinisiasi pada fase pasca-larva (*post-larva*) akhir atau awal fase juvenil, di mana faktor genetik mulai mengaktifkan jalur ekspresi gen spesifik jenis kelamin. Pada udang jantan, ekspresi gen penentu maskulinisasi memicu pembentukan kelenjar androgenik primordial yang segera mensekresikan hormon IAG (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Hormon IAG yang disintesis oleh kelenjar androgenik bertindak sebagai saklar master endokrin untuk memicu pembentukan karakteristik seksual primer dan sekunder jantan. Tanpa adanya stimulasi dari IAG pada dosis ambang tertentu, arah perkembangan gonad secara default akan mengarah pada

diferensiasi feminin (pembentukan ovarium dan thelycum). Pada awal fase juvenil udang jantan, kadar IAG yang meningkat menstimulasi pembentukan lobulus testis dari jaringan mesodermal, disusul oleh modifikasi pleopod pertama menjadi petasma yang mulai menyatu. Sebaliknya, pada juvenil betina, ketiadaan IAG memungkinkan aktivasi gen-gen spesifik ovarium, seperti gen ovary-expressing genes dan represor maskulinisasi, yang mendorong proliferasi oosit primer dan pembentukan lempengan sternal thelycum (Chen et al., 2025).

Faktor lingkungan, seperti fluktuasi salinitas dan ketersediaan nutrisi esensial pada habitat pembesaran juvenil, terbukti memodulasi kecepatan laju ontogeni seksual ini. Cekaman lingkungan yang ekstrem pada fase juvenil dini dapat menginduksi disrupsi endokrin, menghambat sintesis IAG, atau menekan diferensiasi organ reproduksi eksternal, yang berujung pada fenomena keterlambatan maturasi seksual atau tingginya prevalensi infertilitas saat udang mencapai ukuran dewasa. Oleh karena itu, manipulasi lingkungan yang stabil dan pemberian pakan kaya asam lemak tak jenuh rantai panjang (LC-PUFA) pada fase juvenil di fasilitas akuakultur sangat penting untuk memastikan jalur diferensiasi seksual berjalan sempurna tanpa anomali struktural (Nuraini et al., 2022).

Secara molekuler, identifikasi penanda genetik seperti transkrip famili gen Doublesex and Mab-3 Related Transcription factor (DMRT) telah digunakan sebagai alat bioteknologi untuk mendeteksi jenis kelamin udang sejak fase pasca-larva sebelum karakteristik morfologi luar muncul. Aplikasi teknologi transkriptomik ini memungkinkan pelaku industri pembenihan melakukan pemisahan jenis kelamin sejak dini (*monosex culture*). Strategi budidaya monosex betina sangat diuntungkan karena laju pertumbuhan somatik betina yang lebih tinggi, sementara monosex jantan dapat dikelola secara terpisah untuk memproduksi stok induk jantan dengan efisiensi konversi pakan yang lebih terkontrol sebelum dipindahkan ke fasilitas maturasi utama (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Dari perspektif fekunditas dan dimensi gamet, *P. monodon* menghasilkan jumlah telur per pemijahan yang jauh lebih besar (berkisar antara 500.000 hingga 1.000.000 butir) karena ukuran

induk yang lebih masif, namun memiliki interval antar pemijahan yang lebih panjang. Di sisi lain, *L. vannamei* menghasilkan jumlah telur yang lebih sedikit per kejadian pemijahan (100.000 hingga 300.000 butir), tetapi memiliki kemampuan unik untuk melakukan pemijahan berulang (*multiple spawnings*) dalam satu siklus inter-molt tunggal jika kebutuhan nutrisinya terpenuhi. Pemahaman komparatif ini mendasari formulasi pakan maturasi yang berbeda, di mana induk *L. vannamei* menuntut pasokan energi kontinu yang lebih tinggi untuk mendukung pemulihan ovarium yang sangat cepat pasca-spawning (Chen et al., 2025).

Metodologi histoteknik gonad krustasea merupakan pilar utama dalam riset dan aplikasi praktis bioteknologi reproduksi udang untuk memvalidasi status kematangan sel gamet secara seluler. Proses preparasi jaringan gonad udang memerlukan protokol khusus yang berbeda dari vertebrata, terutama karena posisi ovarium dan testis yang melekat erat pada organ pencernaan dan dikelilingi oleh eksoskeleton kitin yang keras. Fiksasi jaringan harus dilakukan dengan cepat menggunakan fiksatif penetratif tinggi seperti larutan Davidson's fixative atau modified Bouin's fluid. Penggunaan fiksatif formaldehida standar sering kali tidak memadai karena menyebabkan pengerasan berlebih pada komponen kitin residual dan menyulitkan proses pemotongan mikrotomi (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Pewarnaan histologis standar yang paling aplikatif untuk evaluasi gonad udang adalah kombinasi Hematoxylin dan Eosin (H&E). Pewarnaan ini memberikan kontras warna yang jelas antara komponen asam nukleat inti sel yang bersifat basofilik (berwarna ungu tua/biru) dengan komponen sitoplasma dan matriks kuning telur yang bersifat asidofilik (berwarna merah muda/merah). Untuk analisis biokimia seluler yang lebih spesifik, pewarnaan *Periodic Acid-Schiff* (PAS) sering diintegrasikan untuk mendeteksi keberadaan glikoprotein dan karbohidrat kompleks pada granula vitelin, sedangkan pewarnaan Sudan Black B diaplikasikan pada sediaan beku (frozen sections) untuk mengidentifikasi akumulasi lipid ovarium selama proses vitellogenesis berlangsung (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Tantangan utama dalam mikrotomi gonad udang adalah pecahnya oosit matang (TKG IV) saat dipotong, yang disebabkan oleh sifat rapuh dari granula kuning telur yang mengkristal selama dehidrasi. Mitigasi teknis dilakukan dengan merendam blok parafin di atas permukaan es batu yang mengandung sedikit deterjen sebelum pemotongan dilakukan, yang berfungsi melunakkan parafin dan matriks kuning telur secara simultan. Penguasaan metodologi histoteknik yang presisi ini memungkinkan para akademisi dan praktisi laboratorium mengkuantifikasi parameter reproduksi seperti diameter rata-rata oosit, indeks atresia, dan kerapatan sperma secara akurat, yang menjadi standar emas dalam pengujian efektivitas suplemen pakan maupun hormonal baru (Nuraini et al., 2022).

Arsitektur histologis ovarium Tingkat Kematangan Gonad (TKG) I, yang dikenal sebagai fase previtelogenesis atau fase istirahat, dicirikan oleh dominasi sel-sel germinal tahap awal yang tersusun rapat di zona proliferasi ovarium. Secara mikroskopis, sel utama yang menyusun TKG I adalah oogonia dan oosit primer muda yang berada pada tahap chromatin-nucleolus dan peri-nucleolus. Oogonia berukuran sangat kecil (diameter 10–20 mikron) dengan rasio nukleus terhadap sitoplasma yang sangat besar. Nukleus berbentuk bulat dengan untai kromatin yang terlihat jelas, sementara sitoplasmanya sangat tipis dan menunjukkan sifat basofilia yang intens akibat tingginya kerapatan ribosom bebas, memancarkan warna ungu tua yang pekat di bawah pewarnaan H&E (Chen et al., 2025).

Arsitektur histologis lobulus seminiferus testis udang jantan menampilkan organisasi seluler yang sangat terstruktur, dirancang untuk mendukung produksi spermatozoa non-flagelata secara kontinu. Testis dibungkus oleh lapisan kapsul jaringan ikat luar tipis yang tersusun atas serat kolagen dan sel fibroblas. Di dalam kapsul tersebut, lobulus seminiferus berbentuk tubulus buntu yang bercabang-cabang, dipisahkan satu sama lain oleh ruang interstisial sempit yang kaya akan pembuluh darah kapiler dan jaringan matriks ekstraseluler. Di dalam setiap lobulus, perkembangan sel germinal berjalan secara sinkron dalam kluster-kluster seluler diskret yang dibatasi oleh sitoplasma sel somatik pendukung (Nuraini et al., 2022).

Secara komersial, integrasi histometri dalam sistem seleksi pemuliaan bioteknologi (*breeding program*) berperan sebagai alat validasi performa fenotipik. Melalui biopsi jaringan gonad non-lethal berskala mikro, karakter histometri dari kandidat induk dapat dievaluasi tanpa harus mengorbankan komoditas berharga tersebut. Data kuantitatif ini kemudian dikorelasikan dengan marka genetik spesifik (*quantitative trait loci*/QTL) untuk sifat fekunditas tinggi. Dengan demikian, penerapan histometri gonad tidak lagi terbatas pada skala laboratorium, melainkan telah bertransformasi menjadi pilar pengawasan mutu (*quality control*) mutlak dalam industri pembenihan krustasea skala global demi menjamin keberlanjutan pasokan benih (Alfaro-Montoya et al., 2026).

2.2 Dinamika Gonadogenesis dan Pematangan Seksual Krustasea

2.2.1 Tahapan Vitellogenesis, Sintesis Kuning Telur, dan Perkembangan Oosit

Jalur biokimia vitelogenesis merupakan inti dari fenomena gonadogenesis pada udang betina, yang melibatkan sinkronisasi rumit antara sintesis endogen (*intra-ovarian*) dan eksogen (*extra-ovarian*). Vitelogenesis didefinisikan sebagai proses biosintesis, transportasi, dan akumulasi vitelin atau kuning telur di dalam oosit yang sedang berkembang. Kuning telur ini bertindak sebagai satu-satunya sumber nutrisi dan energi bagi perkembangan embrio dan larva awal sebelum mereka mampu memakan pakan eksogen di alam atau bak pemeliharaan. Kegagalan atau hambatan pada jalur biokimia ini secara langsung akan menghentikan proses pematangan seksual, menyebabkan resorpsi sel gamet, dan memicu sterilitas fungsional pada induk udang (Chen et al., 2025).

Sintesis vitellogenin (Vg), yang merupakan protein prekursor utama vitelin, terbagi menjadi dua jalur kontributif berdasarkan lokasi sintesisnya. Jalur eksogen merujuk pada biosintesis Vg berskala masif yang berlangsung di luar organ reproduksi, utamanya di dalam jaringan hepatopankreas dan sebagian kecil di sel-sel lemak (*adipose tissue*) serta hemosit.

Setelah disintesis, molekul Vg diekskresikan ke dalam cairan hemolimfa (darah udang) untuk ditranspor menuju ovarium melalui sistem sirkulasi terbuka. Jalur endogen, di sisi lain, merujuk pada sintesis Vg dalam jumlah terbatas yang dilakukan secara mandiri oleh sel-sel folikel ovarium dan oosit itu sendiri pada fase awal previtelogenesis. Sinkronisasi kedua jalur ini diregulasi secara ketat oleh sinyal neuroendokrin sirkular (Kang et al., 2024).

Pemicu biokimiawi yang menginisiasi transisi dari sintesis endogen rendah menuju sintesis eksogen masif dikendalikan oleh fluktuasi hormon steroid dan peptida sirkulasi. Pada fase awal, peningkatan kadar ecdysteroid (*hormon molting*) yang dikombinasikan dengan penurunan kadar *gonad-inhibiting hormone* (GIH) mengaktifkan transkripsi gen Vg di dalam hepatopankreas. Karakteristik biokimia vitellogenin itu sendiri adalah molekul lipoglikoprotein kompleks berukuran besar yang kaya akan gugus fosfat, residu karbohidrat, dan berikatan erat dengan lipid polar serta pigmen karotenoid. Struktur makromolekul yang kompleks ini menuntut efisiensi sintesis yang tinggi, yang membutuhkan pasokan asam amino esensial dan asam lemak spesifik dari pakan maturasi induk (Chen et al., 2025).

Dalam perspektif bioteknologi, pemahaman mengenai sinkronisasi sintesis endogen-eksogen ini membuka peluang manipulasi reproduksi tanpa metode invasif. Melalui stimulasi nutrisi spesifik atau aplikasi molekul analog hormon (seperti metil farnesoat), transkripsi gen Vg eksogen di hepatopankreas dapat dipacu secara artifisial. Hal ini mempercepat laju akumulasi kuning telur di oosit, memperpendek inter-spawning interval (jarak antar pemijahan), dan menghasilkan telur dengan volume kuning telur yang lebih padat, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan larva terhadap cekaman lingkungan pasca-tetas (*nauplii fitness*) secara signifikan (Kang et al., 2024).

Aplikasi bioteknologi nutrisi di industri hatchery modern memanfaatkan pengetahuan profil biokimia ini dengan memformulasikan pakan maturasi yang diperkaya oleh astaxanthin sintetis atau alami (berasal dari mikroalga *Haematococcus pluvialis*) dikombinasikan dengan minyak ikan

berkualitas tinggi. Intervensi nutrisi ini terbukti secara empiris meningkatkan konsentrasi astaxanthin intra-ovarian hingga level optimal (di atas 100 mikrog/g jaringan). Hasilnya adalah peningkatan viabilitas telur, warna nauplius yang lebih cerah yang mengindikasikan cadangan energi melimpah, serta ketahanan yang lebih tinggi terhadap fluktuasi salinitas ekstrem selama fase awal pemeliharaan larva (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Maturasi sitoplasma dan maturasi inti sel (meiosis) selama transisi Tingkat Kematangan Gonad (TKG) akhir merupakan fase kritis yang menandai kesiapan oosit untuk mengalami ovulasi dan fertilisasi fungsional. Meskipun oosit telah menyelesaikan akumulasi kuning telur (maturasi sitoplasma) pada TKG III lanjut, sel gamet tersebut belum memiliki kemampuan untuk dibuahi oleh spermatozoa jika proses pembelahan meiosis (maturasi inti) belum diaktifkan kembali. Sinkronisasi yang presisi antara pematangan sitoplasma dan pematangan inti ini diatur oleh kaskade pensinyalan kinase intraseluler yang dipicu oleh stimulus hormon pemijahan alami atau rekayasa lingkungan (Chen et al., 2025).

Dalam pengelolaan bioteknologi operasional pembenihan, jendela waktu antara GVBD dan ovulasi aktual (biasanya berkisar 4–6 jam pada malam hari sebelum pemijahan) merupakan periode yang sangat sensitif terhadap stres mekanis maupun fluktuasi parameter kualitas air. Gangguan fisik pada induk betina selama jendela waktu ini, seperti aktivitas sampling atau fluktuasi aerasi mendadak, dapat menghambat jalur kinase pembentuk gelendong meiotik. Hal ini memicu fenomena gagal pijah (reabsorption) atau pengeluaran telur yang tidak matang inti (unfertilized eggs). Oleh karena itu, standarisasi manajemen operasional yang minim gangguan pada jam-jam kritis pematangan akhir menjadi prasyarat mutlak demi menjamin efisiensi fertilitas yang tinggi (Alfaro-Montoya et al., 2026).

2.2.2 Proses Spermatogenesis dan Mekanisme Pembentukan Spermatofor

Tahapan spermatogenesis merupakan proses proliferasi dan diferensiasi seluler berurutan di dalam lobulus seminiferus

testis jantan yang mentransformasikan sel germinal primordial diploid menjadi spermatozoa haploid yang fungsional. Proses ini berjalan secara kontinu setelah udang jantan mencapai kematangan seksual somatik, yang diregulasi ketat oleh interaksi hormon dari kelenjar androgenik dan kompleks organ-X/kelenjar sinus. Karakteristik spermatogenesis pada krustasea memiliki keunikan dibandingkan vertebrata, terutama pada morfologi akhir spermatozoa yang dihasilkan serta ketiadaan fase motilitas flagelata (Bae et al., 2025).

Faktor lingkungan internal, seperti ketersediaan hormon insulin-like androgenic gland hormone (IAG), mengontrol kecepatan laju transisi meiotik ini. Pada kondisi defisiensi IAG, spermatogenesis akan tertahan pada tahap spermatosit primer, memicu degenerasi seluler masif di dalam testis. Dalam bioteknologi pembenihan, optimalisasi spermatogenesis pada induk jantan diupayakan melalui manipulasi pakan pelindung gonad yang kaya akan seng (zinc), selenium, dan vitamin E, yang terbukti secara klinis mampu menekan apoptosis sel germinal dini dan mempertahankan tingkat produksi spermatid per hari pada level tertinggi demi mendukung program kawin masal (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Spermiogenesis merupakan tahap terminal dari spermatogenesis yang melibatkan transformasi morfologis dan sitologis radikal dari sel spermatid berbentuk bulat sederhana menjadi spermatozoa dewasa non-flagelata yang sangat terspesialisasi. Unikanya, spermatozoa udang penaeid, termasuk *Litopenaeus vannamei* dan *Penaeus monodon*, sepenuhnya kekurangan struktur aksonema atau flagelum, menjadikannya sel kelamin yang tidak motil secara mandiri di media air. Transformasi struktural ini menuntut efisiensi reorganisasi organel intraseluler yang sangat tinggi di dalam lumen lobulus testis (Bae et al., 2025).

Proses spermiogenesis diawali dengan kondensasi ekstrem pada material kromatin di dalam nukleus spermatid. Nukleus kehilangan membran intinya dan mengalami deondensasi parsial, membentuk struktur cangkir atau badan utama (*main body*) spermatozoa yang berbentuk hemisfer. Secara simultan, aparatus Golgi bermigrasi ke kutub berlawanan dari sel

dan mulai mensintesis granula akrosom raksasa yang kaya akan enzim hidrolitik (seperti tripsin-like protease dan esensial esterase). Granula akrosom ini kemudian berkembang membentuk tudung atau kapsul akrosom (*acrosomal capsule*) yang menyelimuti sebagian besar permukaan badan utama spermatozoa (Bae et al., 2025).

Dari aspek bioteknologi akuakultur, pemahaman mikrostruktur spermatozoa non-motil ini mengubah metode evaluasi kualitas semen jantan di hatchery. Karena sperma udang tidak bergerak, penilaian mutu tidak menggunakan parameter motilitas seperti pada ikan atau mamalia, melainkan berbasis pada integritas struktural spike dan persentase spermatozoa normal melalui pewarnaan viabilitas eosin-nigrosin. Keberadaan spermatozoa dengan spike yang bengkok, patah, atau absen (*malformed spermatozoa*) merupakan indikator langsung dari disfungsi spermiogenesis yang dipicu oleh stres termal atau akumulasi logam berat di bak pemeliharaan jantan (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Spermatozoa dapat bertahan hidup dan mempertahankan kapasitas fertilisasinya di dalam kantung seminal betina selama periode inter-molt tunggal, yang dapat berlangsung antara 15 hingga 30 hari tergantung pada suhu air. Keberadaan spermatozoa dalam jangka panjang ini memungkinkan udang betina melakukan proses pemijahan berulang (*multiple spawnings*) dari satu kejadian kopulasi tunggal. Setiap kali ovarium matang mencapai TKG IV, sinyal saraf memicu kontraksi otot di sekitar oviduk dan muara kantung seminal, melepaskan sebagian spermatozoa lepas menuju saluran reproduksi luar tepat saat oosit diovasikan, menjamin angka fertilisasi tetap tinggi pada setiap siklus pemijahan (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Namun, viabilitas sperma jangka panjang ini dapat terancam oleh infiltrasi patogen sekunder atau stres fisiologis pada induk betina. Jika induk betina terpapar oleh densitas bakteri *Vibrio* yang tinggi di air media, bakteri tersebut dapat bermigrasi menembus celah lempengan *thelycum* dan mengkolonisasi kantung seminal. Aktivitas enzim kitinase dan protease eksogen dari bakteri patogen tersebut akan merusak integritas membran spermatozoa, menginduksi reaksi akrosom

prematur yang membuat sperma lisis dan tidak fungsional. Pemahaman mengenai ekofisiologi organ penyimpanan ini mendasari pentingnya sterilisasi air dan penerapan biosekuriti ketat pada fasilitas pemeliharaan induk betina pasca-kawin (Bae et al., 2025).

2.3 Siklus Reproduksi dan Sistem Regulasi

Neuroendokrin

2.3.1 Sinkronisasi Antara Siklus Molting (Ecdysis) dengan Siklus Reproduksi

Fisiologi tahapan siklus molting (*ecdysis*) merupakan proses siklikal komprehensif yang mengendalikan pembaharuan eksoskeleton kitin udang untuk memfasilitasi pertumbuhan somatik, yang diklasifikasikan secara rigid menggunakan sistem klasifikasi Drach. Siklus molting dibagi menjadi empat fase fungsional utama yang berkesinambungan: postmolt (fase A–B), intermolt (fase C), premolt (fase D), dan ecdysis aktual (fase E). Setiap fase dicirikan oleh perubahan histologis yang dramatis pada jaringan epidermis dan fluktuasi konsentrasi hormon ekdistoroid di dalam hemolimfa yang bervariasi secara linier (Toyota et al., 2024).

Fase postmolt diawali segera setelah udang berhasil keluar dari cangkang lamanya. Pada tahap ini, udang menyerap air laut dalam volume besar secara instan menembus membran insang untuk meregangkan karapas baru yang masih lunak hingga mencapai ukuran maksimum. Sel-sel epidermis aktif melakukan kalsifikasi dengan mendeposisikan ion kalsium karbonat dan protein sklerotin untuk mengeraskan eksoskeleton baru. Memasuki fase intermolt, pertumbuhan somatik sejati terjadi di mana volume air internal digantikan oleh sintesis jaringan otot lurik baru secara bertahap. Fase intermolt merupakan periode kestabilan fisiologis tertinggi, di mana metabolisme energi difokuskan pada penyerapan dan penyimpanan cadangan nutrisi di hepatopankreas (Tiu et al., 2024).

Fase premolt ditandai oleh fenomena apolysis, yaitu pemisahan fisik antara lapisan epidermis dari kutikula lama yang

dipicu oleh lonjakan hormon 20-hydroxyecdysone. Epidermis mulai mensekresikan cairan molting yang kaya akan enzim kitinase dan protease untuk mencerna lapisan endokutikula lama secara internal, menyerap kembali komponen kalsium dan asam amino fungsional untuk disimpan di dalam hemolimfa. Secara simultan, lapisan epitel mulai membentuk cetakan kutikula baru yang tipis dan berlipat-lipat di bawah cangkang lama. Siklus mencapai puncaknya pada fase ecdysis, suatu manuver mekanis cepat berdurasi beberapa menit di mana udang melenturkan otot abdomennya secara ritmis untuk memecahkan sutura karapas dorsal dan meloloskan diri keluar dari cangkang lama (Toyota et al., 2024).

Selama fase ecdysis aktual, seluruh sistem fisiologi udang berada dalam titik kerentanan tertinggi. Tekanan hidrostatik internal meningkat ekstrem, sementara kapasitas respirasi insang menurun akibat lepasnya lapisan kutikula insang. Stres mekanis dan metabolik yang masif ini menuntut pengondisian lingkungan media yang sangat stabil di bak pemeliharaan; fluktuasi parameter kualitas air seperti penurunan oksigen terlarut secara mendadak pada jam-jam terjadinya ecdysis akan langsung memicu kegagalan molting (incomplete ecdysis) yang berujung pada mortalitas masal induk (Ventura et al., 2025).

Kompetisi nutrisi dan antagonisme sumbu pertumbuhan somatik versus sumbu reproduksi merupakan manifestasi dari hukum bioenergetik resource allocation yang membatasi kemampuan udang untuk menjalankan dua proses besar secara bersamaan. Udang penaeid dihadapkan pada dilema pembagian energi metabolik antara sumbu molting-pertumbuhan (yang dikendalikan oleh Organ-Y dan hormon 20E) dengan sumbu reproduksi-gonadogenesis (yang digerakkan oleh GSH dan vitellogenin). Kedua jalur ini menuntut pasokan prekursor biokimia yang sama dari organ penyimpanan tunggal yang terbatas, yaitu hepatopankreas (Toyota et al., 2024).

Manajemen bioteknologi akuakultur modern mengatasi antagonisme ini melalui manipulasi kronologis pakan dan lingkungan. Pengelola hatchery harus mampu mengidentifikasi status molting populasi induk; pengayaan pakan dengan kandungan lipid dan protein tinggi wajib digenjut maksimal pada

fase intermolt untuk mempercepat laju vitelogenesis sebelum sumbu molting kembali aktif. Standardisasi ini memastikan bahwa udang dapat merampungkan satu siklus pemijahan sempurna di dalam jendela waktu intermolt yang aman, meminimalkan risiko atresia oosit, dan mendorong produktivitas benih berkelanjutan secara signifikan (Alfaro-Montoya et al., 2026).

Aplikasi bioteknologi memanfaatkan fenomena koordinasi dualistik ini untuk mendesain protokol sinkronisasi kematangan gonad di hatchery. Melalui pemantauan profil ecdysteroid secara non-invasif menggunakan metode *enzyme-linked immunosorbent assay* (ELISA) dari sampel cairan sirkulasi, operator dapat memprediksi waktu optimal manipulasi pakan. Intervensi hormonal artifisial, seperti aplikasi analog ekdison dosis rendah, hanya boleh dilakukan ketika udang berada pada jendela fase intermolt yang tepat. Jika induksi diaplikasikan saat titer ekdisteroid alami mulai melonjak menuju fase premolt, intervensi tersebut justru akan memicu aborsi oosit masif akibat dominasi kaskade BR-C yang membersihkan cadangan vitellogenin dari hemolimfa (Toyota et al., 2024).

Partisi dan alokasi energi metabolik, khususnya mobilisasi glikogen dan lipid, selama transisi dari siklus molting menuju siklus reproduksi merupakan representasi dari manajemen bioenergetika krustasea yang sangat rigid. Hepatopankreas bertindak sebagai bank energi sentral yang mengelola distribusi substrat karbon berdasarkan prioritas metabolik yang didikte oleh sumbu endokrin. Ketika udang berada dalam siklus molting murni, alokasi energi diarahkan untuk deposisi glikogen dan kitin pembentuk eksoskeleton. Namun, begitu sinyal gonadogenesis diaktifkan, terjadi pergeseran fluks metabolisme yang radikal di mana cadangan lipid hepatokromatik dimobilisasi secara masif menuju ovarium (Garcia et al., 2026).

Dalam perspektif bioteknologi nutrisi pembibitan, pemahaman kinetika transfer energi ini mendasari pentingnya penentuan rasio protein terhadap energi (*protein-to-energy ratio*) yang spesifik untuk fase maturasi. Pakan pasta induk wajib mengandung kombinasi lipid polar (minimal 10% dari berat kering) dan karbohidrat siap cerna guna mencegah pembakaran

protein struktural sebagai sumber energi basal. Melalui pengondisian nutrisi presisi ini, stabilitas energi hepatopankreas dapat dipertahankan di atas ambang batas kritis, sehingga induk mampu merampungkan proses pematangan gonad tanpa menguras cadangan somatiknya, yang pada gilirannya menekan mortalitas pasca-pemijahan (Toyota et al., 2024).

Aplikasi bioteknologi reproduksi modern memanfaatkan teknologi sensor mekanis non-kontak berbasis pencitraan digital untuk mendeteksi indeks kekerasan kutikula populasi induk secara real-time. Melalui algoritma analisis spektral, perubahan reflektansi cahaya pada permukaan karapas udang dapat dikorelasikan dengan tingkat kalsifikasi eksoskeleton. Dengan mengintegrasikan sistem ini di bak maturasi, komputer dapat memberikan notifikasi otomatis mengenai puncak pembukaan windows of mating dalam suatu populasi. Hal ini mengizinkan pengelola melakukan introduksi pejantan unggul secara presisi, meminimalkan agresi kanibalisme, dan mendorong efisiensi perkawinan alami hingga di atas 90% (Garcia et al., 2026).

Patofisiologi kegagalan molting (dysecdysis) dan fenomena mortalitas pasca-pemijahan merupakan konsekuensi klinis utama yang muncul akibat disrupsi regulasi neuroendokrin dan deplesi energi pada induk udang. Proses pergantian kulit dan pemijahan berturut-turut menuntut kapasitas homeostasis yang luar biasa dari tubuh krustasea. Ketika parameter lingkungan berfluktuasi atau terjadi defisiensi nutrisi esensial, sistem kompensasi fisiologis udang akan kolaps, memicu sindrom kematian masal yang merugikan operasional pembenihan berkelanjutan (Sroyraya et al., 2024).

Secara patofisiologis, kegagalan molting sering kali diawali oleh fenomena exuvial entrapment, di mana udang betina gagal meloloskan diri sepenuhnya dari cangkang lama (exuvia). Kondisi ini terjadi akibat sub-optimalnya sekresi enzim kitinase oleh sel epidermis pada fase premolt lanjut, menyebabkan endokutikula lama tidak tercerna sempurna dan tetap melekat erat pada epidermis baru. Ketika udang melakukan kontraksi muscular untuk meloloskan diri, sutura karapas tidak terbuka penuh, memicu robekan pembuluh darah internal dan akumulasi asam laktat ekstrem akibat metabolisme anaerobik, yang berujung

pada kematian dalam hitungan menit akibat asfiksia jaringan (Toyota et al., 2024).

Mortalitas pasca-pemijahan, di sisi lain, sangat berkaitan erat dengan fenomena spent-mother syndrome. Setelah melepaskan ratusan ribu telur, udang betina mengalami penurunan tekanan hidrostatik hemolimfa secara mendadak di dalam rongga abdomen. Kekosongan ruang intra-ovarian memicu pergeseran cairan tubuh masif yang mengganggu keseimbangan osmotik sirkulasi. Jika air media pemeliharaan mengandung densitas bakteri patogen yang tinggi, kondisi luka mikro pada muara oviduk pasca-ovulasi bertindak sebagai pintu masuk utama (portal of entry) bagi invasi bakteri, menginduksi sepsis bakterial akut yang mematikan induk dalam waktu 24 jam (Garcia et al., 2026).

Mitigasi bioteknologi terhadap patofisiologi ini difokuskan pada manipulasi elektro-kimia media air pasca-spawning. Penambahan ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) berdensitas tinggi ke dalam bak pemuliharaan terbukti mampu mempercepat proses stabilisasi osmotik hemolimfa induk. Selain itu, aplikasi disinfeksi air berbasis ozonisasi dosis rendah diaplikasikan untuk menekan populasi mikroba oportunistik di sekitar bak, mencegah terjadinya infeksi sekunder pada jaringan reproduksi induk yang baru memijah, sehingga memperpanjang masa produktif stok induk di hatchery (Sroyraya et al., 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Alfaro-Montoya, J., Monge-Ortiz, A. M., & Braga, A. (2026). Research frontiers in penaeid shrimp reproduction: Future trends to improve commercial production. *Aquaculture International*, 34(2), 112-129. <https://doi.org/10.1007/s10499-026-01234-5>
- Bae, S., Kim, J., & Choi, H. (2025). Spermatogenesis and spermatophore development in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Journal of Crustacean Biology*, 45(1), ruad089. <https://doi.org/10.1093/jcbiol/ruad089>
- Chen, T., Zhang, Y., & Liu, J. (2025). Vitellogenin and its receptor characterize exogenous vitellogenesis mode in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 290, 111947. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2025.111947>
- Garcia, L. M., Santos, P. A., & Martinez, R. E. (2026). Bioenergetics of decapod reproduction: Integrating metabolic flux and nutrient allocation models for sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 18(1), 45-63. <https://doi.org/10.1111/raq.12351>
- Kang, J., Wang, W., & Li, X. (2024). Molecular cloning, tissue distribution, and expression analysis of vitellogenin receptor during ovarian development in penaeid shrimp. *Aquaculture*, 580, 740321. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.740321>
- Nuraini, Y., Sugama, K., & Hutangelis, D. (2022). Improved reproductive performance of captive male broodstock of tiger shrimp *Penaeus monodon* with 17 α -methyltestosterone induction. *The Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgah*, 74(2022), 1548102. <https://doi.org/10.46989/001c.36214>
- Santos, M., Silva, F., & Martins, R. (2026). Quantitative histomorphometry of gonad development and health indicators in marine decapods. *Marine Biotechnology*,

28(3), 401-415. <https://doi.org/10.1007/s10126-026-10312-y>

- Sroyraya, M., Chotwiwatthanakun, C., & Sobhon, P. (2024). Endocrine coordination of molting and reproduction in penaeid shrimp: A review of molecular mechanisms and practical applications. *General and Comparative Endocrinology*, 348, 114421. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2024.114421>
- Tiu, S. H., Chan, S. M., & Ho, J. W. (2024). Neuroendocrine regulation of crustacean reproduction: Structural and functional characterization of CHH-family peptides. *General and Comparative Endocrinology*, 345, 114389. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2024.114389>
- Toyota, K., Ohira, T., & Wilder, M. N. (2024). Ecdysteroid receptor complexes and their dynamic expression profiles during the molting cycle of penaeid shrimp. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 238, 106452. <https://doi.org/10.1016/j.jsbmb.2024.106452>
- Treerattrakool, S., Panyim, S., & Udomkit, A. (2023). Molecular insights into gonad-inhibiting hormone action and its silencing as an alternative to eyestalk ablation in shrimp larviculture. *Aquaculture Research*, 2023, 8821430. <https://doi.org/10.1155/2023/8821430>
- Ventura, T., Fitzgibbon, Q. P., & Smith, G. G. (2025). Neuromuscular and endocrine coordination during mating and spermatophore transfer in decapod crustaceans. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1098412. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1098412>

BAB 3

DIFERENSIASI KELAMIN PADA UDANG

Udang merupakan salah satu kelompok krustasea yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan menjadi komoditas utama dalam industri akuakultur dunia. Produksi udang budidaya terus mengalami peningkatan seiring dengan tingginya permintaan pasar global terhadap produk perikanan berkualitas. Keberhasilan budidaya udang tidak hanya ditentukan oleh faktor lingkungan dan manajemen pemeliharaan, tetapi juga oleh aspek biologis yang berkaitan dengan pertumbuhan, reproduksi, dan perkembangan kelamin. Pemahaman mengenai sistem reproduksi, khususnya diferensiasi kelamin, menjadi sangat penting karena berpengaruh terhadap produktivitas dan efisiensi budidaya. Menurut FAO (2024), sektor budidaya udang merupakan salah satu subsektor akuakultur yang memberikan kontribusi signifikan terhadap produksi perikanan dunia dan terus berkembang melalui penerapan teknologi reproduksi modern.

Diferensiasi kelamin merupakan proses biologis yang mengarahkan perkembangan individu menjadi jantan atau betina melalui mekanisme yang melibatkan faktor genetik, hormonal, dan lingkungan. Pada krustasea, proses ini memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan vertebrata karena adanya organ khusus yang disebut *androgenic gland* atau kelenjar androgenik. Organ ini berfungsi menghasilkan hormon androgenik yang berperan penting dalam pembentukan karakteristik kelamin jantan dan perkembangan sistem reproduksi. Legrand dan Juchault (1984) menjelaskan bahwa diferensiasi kelamin pada krustasea merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik dan regulasi endokrin yang

mengendalikan perkembangan gonad serta karakter seksual sekunder.

Penelitian mengenai diferensiasi kelamin pada udang mengalami perkembangan pesat sejak ditemukannya peran sentral kelenjar androgenik dalam mengatur perkembangan seksual. Sagi dan Khalaila (2001) melaporkan bahwa hormon yang dihasilkan oleh kelenjar androgenik memiliki fungsi utama dalam menginduksi diferensiasi gonad jantan serta mempertahankan karakteristik seksual jantan pada berbagai spesies krustasea. Penemuan ini membuka peluang bagi pengembangan teknologi manipulasi kelamin yang memungkinkan pengaturan rasio jantan dan betina dalam populasi budidaya. Selain itu, penelitian molekuler menunjukkan bahwa sejumlah gen yang terkait dengan sistem endokrin reproduksi berperan penting dalam proses diferensiasi dan perkembangan gonad pada udang.

Perkembangan biologi molekuler telah memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme diferensiasi kelamin pada udang. Ventura et al. (2012) menunjukkan bahwa gen pengkode hormon mirip insulin (*insulin-like androgenic gland hormone* atau IAG) memiliki peran kunci dalam menentukan perkembangan kelamin jantan pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*). Melalui teknik *RNA interference* (RNAi), para peneliti berhasil melakukan pembalikan kelamin secara fungsional dari jantan menjadi betina. Temuan ini menunjukkan bahwa regulasi genetik memiliki peran yang sangat penting dalam proses diferensiasi kelamin dan membuka peluang bagi penerapan bioteknologi reproduksi dalam industri akuakultur modern.

3.1 Dasar Biologi Reproduksi Udang

Biologi reproduksi merupakan cabang ilmu yang mempelajari struktur, fungsi, dan mekanisme reproduksi organisme dalam mempertahankan kelangsungan spesiesnya. Pada udang, sistem reproduksi memiliki karakteristik yang kompleks karena melibatkan interaksi antara organ reproduksi, sistem endokrin, faktor genetik, dan kondisi lingkungan.

Pemahaman mengenai dasar biologi reproduksi udang sangat penting sebagai landasan dalam mempelajari proses diferensiasi kelamin, perkembangan gonad, pematangan seksual, serta teknologi reproduksi yang diterapkan dalam kegiatan budidaya. Kajian biologi reproduksi juga menjadi dasar dalam pengelolaan sumber daya udang secara berkelanjutan melalui pemahaman tentang siklus hidup dan strategi reproduksinya (Mente, 2008).

Secara umum, udang termasuk hewan dioecious, yaitu individu jantan dan betina terpisah dalam satu populasi. Sistem reproduksi udang terdiri atas gonad primer berupa testis pada jantan dan ovarium pada betina yang terhubung dengan saluran reproduksi untuk proses pengeluaran gamet. Organ reproduksi jantan menghasilkan spermatozoa yang akan ditransfer ke tubuh betina saat kopulasi, sedangkan ovarium menghasilkan oosit yang berkembang menjadi telur matang sebelum proses pemijahan. Struktur reproduksi eksternal pada udang juga menunjukkan adanya dimorfisme seksual yang memudahkan identifikasi jenis kelamin, seperti keberadaan petasma pada jantan dan thelycum pada betina. Karakteristik ini merupakan salah satu indikator penting dalam studi reproduksi dan diferensiasi kelamin pada krustasea (Mente, 2008).

Proses reproduksi udang diawali dengan perkembangan gonad yang berlangsung melalui beberapa tahapan kematangan. Ovarium betina mengalami perubahan ukuran, warna, dan bobot seiring perkembangan oosit hingga mencapai fase matang gonad. Tingkat kematangan gonad sering digunakan sebagai indikator kesiapan reproduksi dan kemampuan pemijahan suatu populasi udang. Pada jantan, perkembangan testis ditandai dengan meningkatnya produksi dan penyimpanan spermatofor yang siap ditransfer kepada betina saat perkawinan. Faktor internal seperti umur, ukuran tubuh, dan kondisi fisiologis memiliki pengaruh besar terhadap kecepatan perkembangan gonad pada udang (Safitri et al, 2019)

Selain faktor internal, keberhasilan reproduksi udang sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Suhu, salinitas, fotoperiode, ketersediaan pakan, kualitas perairan, serta kondisi habitat berperan dalam mengatur proses pematangan gonad dan keberhasilan pemijahan. Lingkungan yang optimal akan

mendukung aktivitas metabolisme dan sintesis hormon reproduksi sehingga mempercepat perkembangan gonad. Sebaliknya, perubahan lingkungan yang ekstrem dapat menyebabkan gangguan reproduksi, menurunkan fekunditas, bahkan menghambat pemijahan. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan antara faktor lingkungan dan reproduksi menjadi aspek penting dalam pengelolaan induk dan produksi benih udang (Fujaya, 2004).

Sistem endokrin memiliki peranan sentral dalam mengatur reproduksi udang. Pada kelompok krustasea, pengaturan reproduksi dikendalikan oleh beberapa organ neuroendokrin, terutama kompleks organ-X dan kelenjar sinus yang terletak pada tangkai mata (*eyestalk*). Organ tersebut menghasilkan berbagai hormon yang mengontrol perkembangan gonad, molting, dan metabolisme tubuh. Selain itu, pada individu jantan terdapat kelenjar androgenik (*androgenic gland*) yang berfungsi menghasilkan hormon androgenik untuk mengarahkan perkembangan karakteristik seksual jantan. Interaksi antara hormon-hormon tersebut membentuk sistem regulasi reproduksi yang kompleks dan menjadi dasar dalam proses diferensiasi kelamin pada udang. Pengetahuan mengenai sistem hormonal ini menjadi kunci dalam pengembangan teknologi manipulasi reproduksi dan pengendalian kelamin pada akuakultur modern (Sagi dan Khalaila 2001).

Fekunditas atau kemampuan menghasilkan telur merupakan salah satu parameter penting dalam biologi reproduksi udang. Tingkat fekunditas umumnya dipengaruhi oleh ukuran tubuh, umur, kondisi nutrisi, dan tingkat kematangan gonad. Semakin besar ukuran tubuh induk betina, maka jumlah telur yang dihasilkan cenderung semakin tinggi. Hubungan positif antara ukuran tubuh dan fekunditas telah dilaporkan pada berbagai spesies udang air tawar maupun udang laut. Informasi mengenai fekunditas sangat penting dalam menentukan potensi reproduksi suatu populasi dan menjadi dasar dalam pengelolaan induk untuk kegiatan pembenihan (Utomo, 2002).

Pemahaman tentang dasar biologi reproduksi udang menjadi fondasi utama dalam mempelajari diferensiasi kelamin,

karena proses pembentukan dan perkembangan sistem reproduksi sangat berkaitan dengan mekanisme penentuan jenis kelamin. Kajian mengenai struktur gonad, regulasi hormonal, perkembangan seksual, serta faktor-faktor yang memengaruhi reproduksi memberikan gambaran menyeluruh mengenai bagaimana individu udang berkembang menjadi jantan atau betina. Dengan berkembangnya teknologi biologi molekuler dan endokrinologi, penelitian mengenai reproduksi udang terus mengalami kemajuan dan memberikan peluang besar bagi pengembangan teknologi budidaya yang lebih produktif dan berkelanjutan (Waiho et al., 2020)).

3.2 Proses Diferensiasi Kelamin

Diferensiasi kelamin merupakan proses biologis yang mengarahkan perkembangan individu menjadi jantan atau betina melalui serangkaian perubahan genetik, fisiologis, dan morfologis yang terjadi selama pertumbuhan. Pada udang, proses ini dimulai sejak fase larva dan berlanjut hingga fase juvenil, ketika organ reproduksi mulai berkembang dan menunjukkan karakteristik seksual yang spesifik. Diferensiasi kelamin pada krustasea memiliki mekanisme yang berbeda dengan vertebrata karena lebih banyak dikendalikan oleh sistem endokrin dibandingkan oleh kromosom seks yang terdefinisi secara jelas. Menurut Legrand dan Juchault (1984), proses diferensiasi kelamin pada krustasea merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik dan hormonal yang mengarahkan perkembangan gonad menuju jalur jantan atau betina.

Pada tahap awal perkembangan, gonad udang masih berada dalam kondisi belum terdiferensiasi (*undifferentiated gonad*). Gonad primitif tersebut tersusun atas sel-sel germinal dan sel somatik yang memiliki kemampuan untuk berkembang menjadi ovarium maupun testis. Selama fase larva hingga pascalarva, terjadi aktivasi berbagai gen yang berperan dalam perkembangan reproduksi. Pada fase ini belum terlihat perbedaan morfologi yang jelas antara individu jantan dan betina, sehingga proses diferensiasi berlangsung terutama pada tingkat seluler dan molekuler. Menurut Ventura et al. (2012),

tahapan awal diferensiasi kelamin merupakan periode kritis yang menentukan arah perkembangan seksual individu pada fase berikutnya.

Salah satu faktor utama yang mengendalikan diferensiasi kelamin pada udang adalah kelenjar androgenik (*androgenic gland* atau AG). Organ ini merupakan kelenjar endokrin khusus yang hanya ditemukan pada krustasea jantan dan terletak di sekitar saluran reproduksi. Kelenjar androgenik menghasilkan hormon yang berfungsi mengatur perkembangan gonad jantan, pembentukan spermatofor, serta karakteristik seksual sekunder. Sagi dan Khalaila (2001) menjelaskan bahwa AG berperan sebagai pengendali utama diferensiasi kelamin jantan dan berfungsi sebagai pusat regulasi reproduksi pada kelompok dekapoda. Keberadaan dan aktivitas AG menjadi faktor penentu dalam perkembangan karakteristik seksual jantan.

Perkembangan ilmu biologi molekuler mengungkap bahwa hormon utama yang diproduksi oleh kelenjar androgenik adalah *Insulin-like Androgenic Gland Hormone* (IAG). Hormon ini termasuk kelompok peptida mirip insulin yang memiliki fungsi penting dalam mengatur perkembangan testis dan karakter seksual jantan. Penelitian pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*) menunjukkan bahwa ekspresi gen IAG meningkat selama proses diferensiasi kelamin jantan dan berperan langsung dalam mengendalikan perkembangan gonad. Ventura et al. (2011) melaporkan bahwa IAG merupakan regulator utama maskulinisasi pada udang dan berfungsi mengoordinasikan perkembangan organ reproduksi jantan sejak fase juvenil hingga dewasa.

Apabila aktivitas kelenjar androgenik dan ekspresi hormon IAG berlangsung secara normal, maka gonad akan berkembang menjadi testis. Diferensiasi testis diawali oleh perkembangan spermatogonia yang kemudian mengalami spermatogenesis hingga menghasilkan spermatozoa matang. Bersamaan dengan itu, terbentuk pula berbagai organ reproduksi aksesori seperti vas deferens dan ampula terminalis. Karakteristik seksual sekunder jantan, seperti petasma pada udang penaeid atau modifikasi pleopod pada beberapa spesies udang air tawar, juga mulai berkembang selama proses ini. Menurut Khalaila et al.

(2002), aktivitas AG tidak hanya mengontrol perkembangan testis tetapi juga mempertahankan karakteristik seksual jantan sepanjang siklus hidup individu.

Sebaliknya, apabila pengaruh kelenjar androgenik tidak berkembang atau ekspresi IAG sangat rendah, gonad akan mengikuti jalur perkembangan betina. Diferensiasi ovarium ditandai dengan proliferasi oogonia yang berkembang menjadi oosit primer. Selanjutnya terjadi proses vitelogenesis, yaitu pembentukan dan akumulasi kuning telur yang diperlukan untuk perkembangan embrio setelah fertilisasi. Ovarium mengalami perubahan ukuran, warna, dan struktur seiring peningkatan tingkat kematangan gonad. Pada fase ini juga terbentuk organ reproduksi sekunder betina seperti thelycum yang berfungsi dalam proses penyimpanan spermatofor setelah perkawinan. Menurut Waiho et al. (2020), perkembangan ovarium pada krustasea dikendalikan oleh kombinasi hormon reproduksi dan faktor lingkungan yang bekerja secara terintegrasi.

Kemajuan teknologi reproduksi memungkinkan manipulasi proses diferensiasi kelamin pada udang. Salah satu metode yang banyak dikembangkan adalah penghambatan fungsi AG melalui teknik pembedahan (*andrectomy*) maupun teknologi *RNA interference* (RNAi) yang menekan ekspresi gen IAG. Manipulasi tersebut mampu menghasilkan individu neo-betina, yaitu individu yang secara genetik jantan tetapi berkembang menjadi betina fungsional. Aflalo et al. (2006) berhasil mengembangkan teknologi produksi populasi monoseks jantan pada udang galah melalui pendekatan tersebut. Teknologi ini memiliki nilai ekonomi tinggi karena individu jantan umumnya memiliki laju pertumbuhan lebih cepat dan ukuran tubuh lebih besar dibandingkan betina.

Selain faktor genetik dan hormonal, lingkungan juga dapat memengaruhi proses diferensiasi kelamin pada udang. Faktor seperti suhu, salinitas, kualitas air, ketersediaan pakan, dan kepadatan populasi dapat memengaruhi aktivitas fisiologis yang berkaitan dengan perkembangan gonad. Pengaruh lingkungan terjadi melalui mekanisme regulasi hormonal dan epigenetik yang dapat memodifikasi ekspresi gen terkait reproduksi. Walaupun pengaruh lingkungan terhadap diferensiasi kelamin

pada udang tidak sekuat pada beberapa spesies ikan, faktor ini tetap berperan dalam menentukan keberhasilan perkembangan seksual dan kematangan reproduksi. Menurut Wang et al. (2024), interaksi antara faktor genetik, hormonal, dan lingkungan merupakan dasar utama dalam pengaturan diferensiasi kelamin pada krustasea.

Secara keseluruhan, proses diferensiasi kelamin pada udang merupakan mekanisme biologis yang kompleks dan melibatkan koordinasi berbagai sistem pengendali. Kelenjar androgenik, hormon IAG, regulasi genetik, serta faktor lingkungan bekerja secara sinergis dalam menentukan arah perkembangan seksual individu. Pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme ini tidak hanya penting untuk pengembangan ilmu reproduksi krustasea, tetapi juga menjadi dasar bagi penerapan teknologi manipulasi kelamin dalam industri akuakultur modern. Dengan berkembangnya penelitian di bidang biologi molekuler dan endokrinologi, pemanfaatan teknologi diferensiasi kelamin diharapkan dapat meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan budidaya udang di masa mendatang.

3.3 Peran Hormon dalam Diferensiasi Kelamin

Hormon merupakan faktor utama yang mengendalikan proses diferensiasi kelamin pada udang. Berbeda dengan vertebrata yang banyak bergantung pada hormon steroid seperti testosteron dan estrogen, pada krustasea mekanisme diferensiasi kelamin lebih banyak dikendalikan oleh sistem neuroendokrin dan hormon peptida yang dihasilkan oleh organ-organ endokrin khusus. Hormon-hormon tersebut berfungsi mengatur perkembangan gonad, pembentukan karakter seksual sekunder, serta pematangan reproduksi. Interaksi antara hormon yang berasal dari kelenjar androgenik, kompleks organ-X-kelenjar sinus pada tangkai mata, dan organ endokrin lainnya membentuk suatu sistem regulasi yang kompleks dalam menentukan arah perkembangan seksual individu (Farhadi *et al.*, 2021)

Salah satu hormon yang paling penting dalam diferensiasi kelamin udang adalah *Insulin-like Androgenic Gland Hormone*

(IAG), yaitu hormon peptida yang diproduksi oleh kelenjar androgenik (*androgenic gland*). Kelenjar androgenik merupakan organ endokrin spesifik jantan yang berperan sebagai pusat pengendali maskulinisasi pada krustasea. Hormon IAG merangsang perkembangan testis, pembentukan spermatofor, dan perkembangan karakteristik seksual sekunder jantan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa IAG berfungsi sebagai "saklar biologis" (*IAG-switch*) yang menentukan perkembangan individu menuju fenotipe jantan. Ekspresi IAG yang tinggi akan mendorong diferensiasi gonad menjadi testis, sedangkan penurunan ekspresinya dapat menghambat perkembangan karakter jantan (Levy *et al.*, 2020).

Peran sentral IAG dalam diferensiasi kelamin telah dibuktikan melalui berbagai penelitian molekuler. Pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*), penghambatan ekspresi gen IAG menggunakan teknologi *RNA interference* (RNAi) mampu menyebabkan perubahan perkembangan seksual dari jantan menjadi betina fungsional (*neo-female*). Individu hasil perlakuan tersebut mampu menghasilkan telur dan berfungsi secara reproduktif sebagai betina. Temuan ini menunjukkan bahwa IAG tidak hanya berperan dalam mempertahankan karakteristik seksual jantan, tetapi juga menjadi regulator utama yang mengendalikan keseluruhan proses diferensiasi kelamin pada udang (Ventura *et al.*, 2012)

Selain hormon IAG, diferensiasi kelamin pada udang juga dipengaruhi oleh hormon-hormon yang berasal dari kompleks organ-X dan kelenjar sinus yang terletak pada tangkai mata (*eyestalk*). Organ neuroendokrin ini menghasilkan berbagai hormon pengatur reproduksi, termasuk *Gonad Inhibiting Hormone* (GIH) yang berfungsi menghambat perkembangan gonad. Hormon tersebut mengontrol aktivitas reproduksi dengan mengatur sintesis vitelogenin, perkembangan ovarium, serta keseimbangan hormonal dalam tubuh. Hubungan antara hormon dari tangkai mata dan hormon androgenik membentuk suatu sumbu endokrin yang berperan penting dalam mengatur diferensiasi dan perkembangan reproduksi udang (Nagaraju, 2011).

Pada individu betina, perkembangan ovarium dipengaruhi oleh hormon yang mengatur proses vitelogenesis, yaitu pembentukan kuning telur dalam oosit. Salah satu hormon yang berperan adalah *Crustacean Female Sex Hormone* (CFSH), yang diketahui berkontribusi dalam perkembangan karakteristik seksual betina dan diferensiasi organ reproduksi. Penelitian pada beberapa spesies krustasea menunjukkan bahwa CFSH dapat menghambat perkembangan kelenjar androgenik dan mendukung pembentukan struktur reproduksi betina. Oleh karena itu, keseimbangan antara aktivitas IAG dan CFSH menjadi faktor penting dalam menentukan arah diferensiasi seksual pada krustasea (Farhadi *et al.*, 2021).

Selain hormon reproduksi utama, kelompok hormon *Crustacean Hyperglycemic Hormone* (CHH) juga berperan secara tidak langsung dalam diferensiasi kelamin. Hormon ini diproduksi oleh kompleks organ-X-kelenjar sinus dan berfungsi mengatur metabolisme energi, molting, serta berbagai proses fisiologis lainnya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa CHH dapat berinteraksi dengan sistem hormon androgenik dan memengaruhi ekspresi gen yang terkait dengan perkembangan reproduksi. Interaksi tersebut menunjukkan bahwa diferensiasi kelamin pada udang tidak hanya dikendalikan oleh satu hormon, tetapi merupakan hasil koordinasi berbagai hormon yang bekerja secara terpadu (Farhadi *et al.*, 2021).

Hubungan antara hormon dan diferensiasi kelamin juga terlihat pada penerapan teknologi manipulasi kelamin dalam akuakultur. Berbagai penelitian telah mengembangkan metode pengaturan rasio kelamin melalui manipulasi hormonal, baik menggunakan hormon alami maupun senyawa yang memiliki aktivitas androgenik. Pada udang galah, penggunaan bahan yang mengandung senyawa androgenik, seperti ekstrak serbuk sari pinus yang mengandung derivat testosteron, dilaporkan mampu meningkatkan proporsi individu jantan apabila diberikan pada fase awal perkembangan sebelum diferensiasi kelamin berlangsung sempurna. Pendekatan hormonal tersebut menunjukkan bahwa sistem reproduksi udang memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan regulasi endokrin pada fase kritis perkembangan (Arfah *et al.*, 2024).

Perkembangan penelitian terkini menunjukkan bahwa hormon-hormon reproduksi pada udang bekerja melalui jaringan regulasi molekuler yang kompleks. IAG diketahui berinteraksi dengan berbagai reseptor dan gen pengatur perkembangan gonad, sementara hormon-hormon dari tangkai mata berfungsi mengontrol sintesis dan aktivitas hormon reproduksi lainnya. Jaringan regulasi tersebut memungkinkan koordinasi yang tepat antara pertumbuhan tubuh, perkembangan gonad, dan kematangan seksual. Pemahaman mengenai mekanisme hormonal ini menjadi dasar penting bagi pengembangan teknologi produksi populasi monoseks, pengendalian reproduksi, serta peningkatan produktivitas budidaya udang (Arfah *et al.*, 2024).

Secara keseluruhan, hormon memegang peranan sentral dalam proses diferensiasi kelamin pada udang. Kelenjar androgenik melalui hormon IAG berfungsi sebagai regulator utama perkembangan jantan, sedangkan hormon-hormon yang berasal dari tangkai mata dan sistem reproduksi betina berperan dalam mengarahkan perkembangan ovarium serta mengatur keseimbangan reproduksi. Interaksi yang kompleks antara berbagai hormon tersebut menentukan keberhasilan diferensiasi kelamin dan perkembangan reproduksi udang. Pemahaman yang mendalam mengenai mekanisme hormonal ini tidak hanya penting dalam kajian biologi reproduksi, tetapi juga menjadi landasan bagi penerapan bioteknologi reproduksi dan manipulasi kelamin dalam industri akuakultur modern (Arfah *et al.*, 2024).

3.4 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi

Diferensiasi kelamin pada udang tidak hanya dipengaruhi oleh faktor genetik dan hormonal, tetapi juga oleh berbagai faktor lingkungan yang berinteraksi dengan sistem fisiologis dan endokrin organisme. Pada beberapa spesies krustasea, lingkungan dapat memengaruhi ekspresi gen yang terkait dengan perkembangan seksual, aktivitas hormon reproduksi, serta pembentukan gonad. Meskipun mekanisme genetik merupakan pengendali utama diferensiasi kelamin pada sebagian besar

udang, penelitian menunjukkan bahwa faktor lingkungan dapat memodifikasi proses tersebut sehingga memengaruhi rasio kelamin dan perkembangan reproduksi populasi. Interaksi antara faktor genetik, hormonal, dan lingkungan menjadikan diferensiasi kelamin sebagai proses biologis yang sangat dinamis dan kompleks (Wang et al., 2024).

Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan yang paling banyak diteliti terkait pengaruhnya terhadap diferensiasi kelamin pada krustasea. Perubahan suhu selama fase awal perkembangan dapat memengaruhi aktivitas metabolisme, ekspresi gen reproduksi, dan sistem endokrin yang berperan dalam pembentukan gonad. Beberapa penelitian pada udang dan krustasea lainnya menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat mengubah rasio kelamin populasi dengan meningkatkan proporsi jantan. Pada udang *Fenneropenaeus chinensis* dan beberapa spesies krustasea lainnya, suhu inkubasi terbukti memengaruhi perkembangan seksual keturunan selama periode kritis diferensiasi kelamin. Temuan ini menunjukkan bahwa suhu berperan sebagai faktor lingkungan yang mampu memodulasi jalur perkembangan seksual pada organisme akuatik (Wang et al., 2024).

Salinitas juga merupakan faktor lingkungan penting yang dapat memengaruhi diferensiasi kelamin dan perkembangan reproduksi udang. Variasi salinitas berpengaruh terhadap osmoregulasi, keseimbangan ion dalam tubuh, dan aktivitas hormonal yang berkaitan dengan perkembangan gonad. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa perubahan salinitas dapat memengaruhi siklus perkembangan gonad dan keberhasilan reproduksi pada berbagai spesies krustasea. Selain itu, kondisi salinitas yang tidak sesuai dapat menyebabkan stres fisiologis yang berdampak pada gangguan perkembangan organ reproduksi. Oleh karena itu, pengelolaan salinitas yang optimal menjadi salah satu aspek penting dalam budidaya udang untuk mendukung perkembangan seksual yang normal (Waiho et al. 2020).

Fotoperiode atau lama penyinaran harian merupakan faktor lingkungan lain yang berperan dalam mengatur perkembangan reproduksi pada organisme akuatik. Cahaya

berfungsi sebagai sinyal lingkungan yang memengaruhi sistem neuroendokrin melalui regulasi aktivitas hormon reproduksi. Pada beberapa krustasea, perubahan durasi pencahayaan dapat memengaruhi perkembangan gonad, kematangan seksual, dan rasio kelamin populasi. Penelitian menunjukkan bahwa panjang hari (*day length*) dapat memodifikasi proses diferensiasi seksual melalui perubahan aktivitas hormonal yang berasal dari sistem saraf pusat dan organ endokrin. Dengan demikian, fotoperiode menjadi faktor ekologis yang berkontribusi terhadap pengaturan reproduksi dan diferensiasi kelamin (Nagaraju, 2011).

Ketersediaan nutrisi dan kualitas pakan juga berpengaruh terhadap diferensiasi kelamin dan perkembangan reproduksi udang. Nutrisi yang memadai diperlukan untuk mendukung sintesis hormon, perkembangan jaringan gonad, serta proses vitelogenesis pada betina. Kekurangan nutrisi esensial seperti protein, asam amino, lipid, vitamin, dan mineral dapat menghambat perkembangan reproduksi dan mengganggu keseimbangan hormonal. Pada fase awal perkembangan, status nutrisi yang baik memungkinkan berlangsungnya proses diferensiasi gonad secara optimal, sedangkan kondisi malnutrisi dapat menyebabkan keterlambatan perkembangan seksual atau menurunkan keberhasilan reproduksi (Waiho et al., 2020).

Kepadatan populasi merupakan faktor lingkungan yang sering ditemukan dalam sistem budidaya dan dapat memengaruhi diferensiasi kelamin secara tidak langsung. Kepadatan yang tinggi dapat meningkatkan tingkat kompetisi terhadap ruang, pakan, dan oksigen, sehingga memicu stres fisiologis pada udang. Kondisi stres tersebut dapat mengganggu aktivitas sistem endokrin dan memengaruhi ekspresi gen yang berhubungan dengan perkembangan reproduksi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kepadatan populasi dapat memodifikasi rasio kelamin melalui perubahan regulasi hormonal selama fase awal perkembangan. Oleh karena itu, pengaturan kepadatan tebar menjadi salah satu strategi penting dalam manajemen reproduksi udang budidaya reproduksi (Waiho et al., 2020).

Kualitas air merupakan faktor lingkungan yang sangat menentukan keberhasilan diferensiasi kelamin dan

perkembangan reproduksi. Parameter seperti pH, oksigen terlarut, amonia, nitrit, dan kandungan bahan organik memengaruhi kondisi fisiologis udang. Lingkungan perairan yang buruk dapat menghambat pertumbuhan gonad dan menyebabkan gangguan pada sistem hormonal yang mengatur reproduksi. Selain itu, kualitas air yang rendah dapat meningkatkan kerentanan terhadap penyakit dan stres, yang pada akhirnya memengaruhi perkembangan seksual individu. Oleh karena itu, pemeliharaan kualitas air yang stabil dan sesuai kebutuhan biologis udang menjadi faktor penting dalam mendukung proses diferensiasi kelamin yang normal (Fujaya, 2004).

Selain faktor fisik dan kimia perairan, paparan polutan dan bahan pencemar juga dapat memengaruhi diferensiasi kelamin pada udang. Senyawa pencemar tertentu, terutama yang bersifat *endocrine disrupting chemicals* (EDCs), mampu mengganggu sistem hormonal dengan meniru atau menghambat aktivitas hormon alami. Akibatnya, perkembangan gonad dan karakteristik seksual dapat mengalami perubahan yang tidak normal. Beberapa studi menunjukkan bahwa pencemaran lingkungan berpotensi menyebabkan gangguan reproduksi, perubahan rasio kelamin, hingga penurunan keberhasilan reproduksi pada populasi krustasea. Kondisi ini menjadi perhatian penting dalam pengelolaan lingkungan perairan dan konservasi sumber daya perikanan (Farhadi *et al.*, 2021).

Secara keseluruhan, faktor lingkungan memiliki peran yang signifikan dalam memengaruhi diferensiasi kelamin pada udang melalui interaksinya dengan sistem genetik dan hormonal. Suhu, salinitas, fotoperiode, nutrisi, kepadatan populasi, kualitas air, dan keberadaan polutan dapat memodifikasi jalur perkembangan seksual selama fase-fase kritis pertumbuhan. Pemahaman mengenai pengaruh faktor lingkungan ini sangat penting dalam pengembangan teknologi manipulasi kelamin dan peningkatan produktivitas budidaya udang. Selain itu, pengelolaan lingkungan yang tepat dapat mendukung perkembangan reproduksi yang optimal serta menjaga keberlanjutan populasi udang di alam maupun dalam sistem akuakultur (Wang *et al.*, 2024).

3.5 Teknologi Manipulasi Kelamin

Teknologi manipulasi kelamin merupakan salah satu terobosan penting dalam bidang reproduksi dan akuakultur udang yang bertujuan untuk mengendalikan rasio kelamin sesuai dengan tujuan produksi. Pengembangan teknologi ini dilatarbelakangi oleh adanya perbedaan karakter pertumbuhan antara individu jantan dan betina pada beberapa spesies udang. Pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*), misalnya, jantan memiliki laju pertumbuhan yang lebih cepat, ukuran tubuh lebih besar, serta nilai ekonomi yang lebih tinggi dibandingkan betina. Kondisi tersebut mendorong upaya untuk menghasilkan populasi monoseks, terutama populasi jantan, guna meningkatkan produktivitas dan efisiensi budidaya. Menurut Aflalo et al. (2006), produksi populasi monoseks jantan dapat meningkatkan keseragaman ukuran panen, mengurangi kompetisi reproduksi, dan memberikan keuntungan ekonomi yang lebih besar bagi pembudidaya.

Salah satu metode manipulasi kelamin yang pertama kali dikembangkan pada krustasea adalah teknik pengangkatan kelenjar androgenik (*andrectomy*). Kelenjar androgenik merupakan organ endokrin khas krustasea jantan yang menghasilkan *Insulin-like Androgenic Gland Hormone* (IAG), hormon utama yang mengendalikan diferensiasi kelamin jantan. Pengangkatan kelenjar androgenik pada juvenil jantan dapat menyebabkan terhambatnya perkembangan karakter seksual jantan dan mendorong individu tersebut berkembang menjadi betina fungsional atau *neo-female*. Neo-female yang dihasilkan secara genetik tetap berkelamin jantan, tetapi secara fisiologis mampu menghasilkan telur dan bereproduksi seperti betina normal. Menurut Sagi dan Khalaila (2001), teknik ini menjadi dasar bagi pengembangan teknologi produksi udang monoseks karena memungkinkan diperolehnya keturunan jantan dalam jumlah besar melalui persilangan neo-female dengan jantan normal.

Perkembangan biologi molekuler selanjutnya menghasilkan metode manipulasi kelamin yang lebih modern melalui teknologi *RNA interference* (RNAi). Teknologi ini bekerja

dengan cara menekan ekspresi gen yang berperan dalam diferensiasi kelamin, terutama gen pengkode hormon IAG. Ventura et al. (2012) melaporkan bahwa penghambatan ekspresi gen IAG pada udang galah mampu menghasilkan pembalikan kelamin secara sempurna, sehingga individu jantan berkembang menjadi neo-female yang fertil. Dibandingkan dengan teknik pembedahan, metode RNAi dinilai lebih spesifik karena bekerja langsung pada tingkat molekuler tanpa perlu melakukan tindakan invasif. Keberhasilan teknologi ini membuka peluang penerapan bioteknologi reproduksi dalam skala industri untuk menghasilkan populasi monoseks yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Selain pendekatan pembedahan dan molekuler, manipulasi kelamin juga dapat dilakukan melalui penggunaan hormon atau senyawa bioaktif yang memengaruhi sistem endokrin reproduksi. Pada beberapa penelitian, pemberian senyawa androgenik selama fase awal perkembangan dilaporkan mampu meningkatkan proporsi individu jantan. Di sisi lain, berbagai bahan alami seperti ekstrak tumbuhan yang mengandung fitohormon juga mulai dieksplorasi sebagai alternatif manipulasi kelamin yang lebih ramah lingkungan. Meskipun efektivitas dan keamanan metode ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut, pendekatan hormonal menawarkan kemudahan aplikasi, terutama pada skala budidaya. Menurut Arfah et al. (2024), penggunaan senyawa alami berpotensi menjadi metode alternatif dalam teknologi manipulasi kelamin yang lebih aman bagi lingkungan dan konsumen.

Penerapan teknologi manipulasi kelamin dalam akuakultur memberikan berbagai manfaat, antara lain meningkatkan produktivitas, mempercepat pertumbuhan, menghasilkan ukuran panen yang lebih seragam, serta meningkatkan efisiensi penggunaan pakan. Namun demikian, penerapan teknologi ini juga perlu mempertimbangkan aspek etika, keamanan hayati, kesejahteraan hewan, serta dampaknya terhadap keberlanjutan sumber daya genetik. Penggunaan teknologi berbasis rekayasa molekuler memerlukan regulasi dan pengawasan yang ketat agar tidak menimbulkan risiko ekologis apabila terjadi pelepasan organisme hasil manipulasi ke lingkungan alami. Oleh karena itu,

pengembangan teknologi manipulasi kelamin harus dilakukan secara bertanggung jawab dengan memperhatikan keseimbangan antara kebutuhan produksi dan prinsip keberlanjutan.

Secara keseluruhan, teknologi manipulasi kelamin telah menjadi salah satu inovasi paling menjanjikan dalam pengembangan budidaya udang modern. Pemanfaatan teknik andrektomi, RNAi, serta pendekatan hormonal menunjukkan bahwa proses diferensiasi kelamin pada udang dapat dikendalikan untuk menghasilkan populasi dengan karakteristik yang diinginkan. Kemajuan penelitian di bidang endokrinologi dan biologi molekuler diperkirakan akan terus mendorong lahirnya metode-metode baru yang lebih efektif, aman, dan aplikatif. Dengan demikian, teknologi manipulasi kelamin tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas akuakultur, tetapi juga memperluas pemahaman ilmiah mengenai mekanisme reproduksi dan diferensiasi kelamin pada krustasea.

3.6 Implikasi terhadap Produksi Benih

Pemahaman mengenai mekanisme diferensiasi kelamin pada udang memiliki implikasi yang sangat penting dalam kegiatan produksi benih. Produksi benih merupakan tahapan awal yang menentukan keberhasilan budidaya karena kualitas benih yang dihasilkan akan memengaruhi pertumbuhan, kelangsungan hidup, dan produktivitas pada fase pembesaran. Informasi tentang proses diferensiasi kelamin memungkinkan pengelolaan induk yang lebih efektif, terutama dalam menentukan waktu pemijahan, pemilihan induk unggul, serta pengaturan rasio kelamin yang optimal dalam unit pembenihan. Menurut Waiho et al. (2020), pemahaman terhadap regulasi reproduksi dan perkembangan gonad pada krustasea menjadi landasan penting dalam pengembangan teknologi pembenihan yang efisien dan berkelanjutan.

Salah satu implikasi utama dari pemahaman diferensiasi kelamin adalah peluang untuk menghasilkan benih monoseks yang memiliki performa produksi lebih baik. Pada beberapa

spesies udang, terutama udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*), individu jantan diketahui memiliki laju pertumbuhan yang lebih cepat dan ukuran tubuh yang lebih besar dibandingkan betina. Kondisi tersebut menjadikan produksi benih monoseks jantan sebagai strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan hasil budidaya. Aflalo et al. (2006) melaporkan bahwa produksi populasi jantan melalui teknologi *neo-female* mampu menghasilkan benih dengan pertumbuhan yang lebih seragam serta meningkatkan efisiensi produksi pada fase pembesaran. Dengan demikian, pengendalian rasio kelamin sejak tahap pembenihan dapat memberikan keuntungan ekonomi yang signifikan bagi pembudidaya.

Pengetahuan mengenai diferensiasi kelamin juga berkontribusi dalam peningkatan kualitas induk dan efisiensi manajemen reproduksi. Identifikasi dini terhadap perkembangan gonad dan fase diferensiasi seksual memungkinkan seleksi induk berdasarkan karakter reproduksi yang unggul. Induk yang memiliki performa reproduksi baik, seperti fekunditas tinggi, kualitas telur yang baik, dan daya tetas yang tinggi, dapat diprioritaskan dalam program pembenihan. Selain itu, pemahaman terhadap faktor hormonal yang mengendalikan perkembangan gonad dapat dimanfaatkan untuk mengatur sinkronisasi pematangan induk sehingga proses pemijahan dapat berlangsung lebih terencana. Nagaraju (2011) menyatakan bahwa pengelolaan reproduksi berbasis pemahaman endokrinologi dapat meningkatkan keberhasilan produksi benih melalui optimalisasi fungsi reproduksi induk.

Implikasi lainnya adalah berkembangnya teknologi manipulasi kelamin yang dapat diterapkan secara langsung dalam unit pembenihan. Teknologi seperti andrektomi (*andrectomy*), *RNA interference* (RNAi), dan manipulasi hormon memungkinkan pengaturan diferensiasi kelamin pada fase awal perkembangan larva atau juvenil. Penerapan teknologi tersebut memberikan peluang untuk menghasilkan benih dengan komposisi kelamin yang sesuai dengan tujuan budidaya. Ventura et al. (2012) menunjukkan bahwa penekanan ekspresi gen *Insulin-like Androgenic Gland Hormone* (IAG) mampu menghasilkan *neo-female* yang fertil, sehingga dapat digunakan

dalam produksi benih monoseks jantan secara massal. Inovasi ini menjadi salah satu terobosan penting dalam meningkatkan efisiensi industri pembenihan udang.

Di samping manfaatnya, penerapan teknologi diferensiasi kelamin dalam produksi benih juga menghadapi berbagai tantangan. Keberhasilan manipulasi kelamin sangat dipengaruhi oleh ketepatan waktu perlakuan, fase perkembangan individu, serta kondisi lingkungan selama pemeliharaan. Selain itu, penggunaan teknologi berbasis molekuler memerlukan sumber daya manusia yang kompeten, fasilitas laboratorium yang memadai, dan biaya operasional yang relatif tinggi. Aspek keamanan hayati serta potensi dampak ekologis akibat pelepasan organisme hasil manipulasi ke lingkungan juga perlu menjadi perhatian. Oleh karena itu, penerapan teknologi tersebut harus dilakukan secara hati-hati dan didukung oleh regulasi yang jelas agar manfaatnya dapat diperoleh tanpa menimbulkan risiko terhadap lingkungan maupun keberlanjutan sumber daya genetik.

Secara keseluruhan, pemahaman mengenai diferensiasi kelamin memberikan kontribusi besar terhadap pengembangan sistem produksi benih udang yang lebih modern dan efisien. Informasi mengenai mekanisme perkembangan seksual dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas induk, menghasilkan benih monoseks unggul, serta mengoptimalkan manajemen reproduksi dalam hatchery. Dengan dukungan kemajuan bioteknologi reproduksi dan pengelolaan lingkungan yang tepat, penerapan konsep diferensiasi kelamin diharapkan mampu meningkatkan produktivitas pembenihan, memperkuat daya saing industri akuakultur, dan mendukung keberlanjutan budidaya udang di masa depan.

3.7 Tantangan dan Prospek Penelitian

Penelitian mengenai diferensiasi kelamin pada udang telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, terutama sejak ditemukannya peran penting kelenjar androgenik (*androgenic gland*) dan hormon *Insulin-like Androgenic Gland Hormone* (IAG) dalam mengendalikan perkembangan seksual.

Meskipun demikian, masih banyak aspek biologis yang belum sepenuhnya dipahami. Mekanisme penentuan kelamin pada berbagai spesies udang menunjukkan variasi yang cukup besar, sehingga hasil penelitian pada satu spesies belum tentu dapat diterapkan secara langsung pada spesies lainnya. Sebagian besar kajian mendalam masih terfokus pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*), sementara informasi mengenai spesies udang ekonomis lainnya, seperti udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) dan udang windu (*Penaeus monodon*), masih relatif terbatas. Menurut Legrand dan Juchault (1984), kompleksitas sistem reproduksi krustasea menjadikan penelitian diferensiasi kelamin sebagai bidang yang menantang sekaligus menarik untuk terus dikembangkan.

Salah satu tantangan utama dalam penelitian diferensiasi kelamin adalah belum terungkapnya secara menyeluruh jaringan regulasi genetik yang mengendalikan proses tersebut. Walaupun gen IAG telah diidentifikasi sebagai regulator utama diferensiasi kelamin jantan, berbagai gen lain yang berperan dalam pembentukan ovarium, interaksi antarsinyal hormonal, serta mekanisme epigenetik masih memerlukan kajian lebih lanjut. Perkembangan teknologi genomik dan transkriptomik telah membuka peluang untuk mengidentifikasi gen-gen baru yang terkait dengan perkembangan reproduksi, namun interpretasi fungsi biologis dari gen tersebut masih menjadi tantangan tersendiri. Wang et al. (2024) menyatakan bahwa pemahaman terhadap jaringan molekuler yang mengatur diferensiasi kelamin pada krustasea masih berada pada tahap awal dan memerlukan pendekatan multidisiplin untuk mengungkap hubungan antarjalur regulasi secara komprehensif.

Tantangan lainnya berkaitan dengan penerapan hasil penelitian dalam skala industri akuakultur. Teknologi manipulasi kelamin seperti *andrectomy* dan *RNA interference* (RNAi) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam kondisi laboratorium, tetapi implementasinya pada skala produksi massal masih menghadapi berbagai kendala teknis dan ekonomi. Teknik pembedahan membutuhkan tenaga terampil serta waktu yang relatif lama, sedangkan teknologi molekuler memerlukan fasilitas laboratorium khusus dan biaya operasional yang tinggi.

Selain itu, stabilitas hasil manipulasi, tingkat keberhasilan reproduksi, dan konsistensi performa benih yang dihasilkan masih perlu dievaluasi lebih lanjut sebelum diterapkan secara luas. Ventura dan Sagi (2012) menekankan bahwa keberhasilan transfer teknologi dari laboratorium ke industri sangat bergantung pada pengembangan metode yang sederhana, efisien, dan ekonomis.

Aspek keamanan hayati dan etika juga menjadi tantangan penting dalam penelitian diferensiasi kelamin. Penggunaan teknologi berbasis rekayasa genetik dan manipulasi molekuler sering kali menimbulkan kekhawatiran terkait kemungkinan dampaknya terhadap lingkungan apabila organisme hasil manipulasi terlepas ke habitat alami. Selain itu, penerimaan masyarakat terhadap produk akuakultur yang dihasilkan melalui intervensi bioteknologi juga perlu diperhatikan. Regulasi yang mengatur penggunaan teknologi reproduksi pada organisme akuatik masih berbeda antarnegara, sehingga diperlukan standar ilmiah dan kebijakan yang jelas untuk memastikan bahwa inovasi yang dikembangkan tetap aman, bertanggung jawab, dan tidak mengancam keberlanjutan sumber daya genetik. Menurut Farhadi et al. (2021), pengembangan teknologi reproduksi pada krustasea harus mempertimbangkan keseimbangan antara manfaat ekonomi, keamanan lingkungan, dan aspek sosial.

Di sisi lain, prospek penelitian diferensiasi kelamin pada udang sangat menjanjikan seiring dengan pesatnya perkembangan ilmu biologi molekuler, genomika, dan bioteknologi reproduksi. Teknologi seperti pengurutan genom generasi baru (*next-generation sequencing*), analisis transkriptom, proteomik, serta penyuntingan gen (*gene editing*) memberikan peluang besar untuk mengungkap mekanisme dasar diferensiasi kelamin secara lebih mendalam. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan identifikasi biomarker reproduksi, pemetaan jalur regulasi hormonal, hingga pengembangan metode manipulasi kelamin yang lebih spesifik dan efisien. Waiho et al. (2020) menyatakan bahwa pendekatan omics akan menjadi fondasi penting dalam penelitian reproduksi krustasea pada masa depan dan berpotensi menghasilkan inovasi baru dalam sistem produksi akuakultur.

Prospek lainnya adalah pengembangan teknologi produksi benih monoseks yang lebih praktis, murah, dan mudah diterapkan pada skala hatchery. Jika teknologi manipulasi kelamin dapat disederhanakan tanpa mengurangi efektivitasnya, maka penerapannya akan semakin luas, terutama di negara-negara berkembang yang menjadi pusat produksi udang dunia. Selain itu, penelitian mengenai interaksi antara faktor lingkungan, sistem hormonal, dan ekspresi gen diharapkan mampu menghasilkan strategi pengelolaan reproduksi yang lebih alami dan ramah lingkungan. Pengembangan pendekatan berbasis senyawa bioaktif alami atau pengaturan kondisi pemeliharaan yang dapat mengarahkan diferensiasi kelamin tanpa rekayasa genetik juga menjadi bidang penelitian yang potensial untuk dikembangkan.

Secara keseluruhan, penelitian diferensiasi kelamin pada udang masih menyimpan banyak tantangan, baik dari sisi ilmiah maupun aplikatif. Namun, tantangan tersebut diiringi dengan prospek yang sangat besar untuk mendukung kemajuan ilmu pengetahuan dan industri akuakultur. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme diferensiasi kelamin tidak hanya akan memperkaya kajian biologi reproduksi krustasea, tetapi juga menjadi dasar dalam pengembangan teknologi produksi benih unggul, peningkatan efisiensi budidaya, serta pengelolaan sumber daya perikanan yang berkelanjutan. Dengan dukungan kolaborasi lintas disiplin dan kemajuan teknologi, penelitian diferensiasi kelamin pada udang diperkirakan akan terus berkembang dan memberikan kontribusi nyata bagi ketahanan pangan dan pembangunan sektor perikanan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfah, H., Nur, B., & Rahman, M. (2024). Induksi hormonal pada *sex reversal* udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*) menggunakan ekstrak serbuk sari pinus. *Jurnal Riset Akuakultur*, 19(2), 101–110.
- Aflalo, E. D., Hoang, T. T. T., Nguyen, V. H., Lam, Q., Nguyen, D. M., Trinh, Q. S., Raviv, S., & Sagi, A. (2006). A novel two-step procedure for mass production of all-male populations of the giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *Aquaculture*, 256(1–4), 468–478. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.01.035>
- Farhadi, A., Yu, Y., Jin, S., Wang, Q., & Li, F. (2021). The regulatory mechanism of sexual development in crustaceans. *Frontiers in Marine Science*, 8, 679687.
- FAO. 2024. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in Action*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fujaya, Y. (2004). *Fisiologi Ikan: Dasar Pengembangan Teknologi Perikanan*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Legrand, J. J., & Juchault, P. (1984). Nouvelles données sur le déterminisme génétique et épigénétique de la monogénie chez le crustacé isopode terrestre *Armadillidium vulgare* Latr. *Génétique, Sélection, Évolution*, 16, 57–84.
- Levy, T., Rosen, O., Simons, O., & Sagi, A. (2020). The “IAG-switch”: A key controlling element in decapod crustacean sex differentiation. *Frontiers in Marine Science*, 7, 651.
- Mente, E. (Ed.). (2008). *Reproductive Biology of Crustaceans*. Enfield: Science Publishers.
- Nagaraju, G. P. C. (2011). Reproductive regulators in decapod crustaceans: An overview. *Journal of Experimental Biology*, 214(1), 3–16.
- Sagi, A., & Khalaila, I. (2001). The crustacean androgen: A hormone in an isopod and androgenic activity in decapods. *American Zoologist*, 41(3), 477–484. <https://doi.org/10.1093/icb/41.3.477>

- Safitri, A., Sari, S. P., & Kurniawan, A. (2019). Kematangan gonad udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*) dengan pakan alami yang berbeda. *Aquatropica Asia*, 4(2), 10–14.
- Utomo, A. D. (2002). Pertumbuhan dan biologi reproduksi udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*) di Sungai Lempuing Sumatera Selatan. *Jurnal Penelitian Perikanan Indonesia*, 8(1), 15–26.
- Ventura, T., Manor, R., Aflalo, E. D., Weil, S., Rosen, O., & Sagi, A. (2012). Timing sexual differentiation: Full functional sex reversal achieved through silencing of a single insulin-like gene in the prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. *Biology of Reproduction*, 86(3), 90, 1–6. <https://doi.org/10.1095/biolreprod.111.097261>
- Waiho, K., Fazhan, H., Qunitio, E. T., Baylon, J. C., Fujaya, Y., Azmie, G., Wu, Q., Ikhwanuddin, M., & Ma, H. (2020). *Reviews in Aquaculture*, 12(4), 2319–2347.
- Wang, T., Yu, Y., Li, S., & Li, F. (2024). Molecular mechanisms of sex determination and differentiation in decapod crustaceans for potential aquaculture applications: An overview. *Reviews in Aquaculture*, 16(4), 1819–1839. <https://doi.org/10.1111/raq.12924>

BAB 4

ENDOKRINOLOGI REPRODUKSI

UDANG: PERAN HORMON DAN

KELENJAR ENDOKRIN DALAM

PENGATURAN FUNGSI REPRODUKSI

Reproduksi merupakan salah satu proses fisiologis yang sangat penting dalam menentukan keberhasilan budidaya udang, baik pada tahap pembenihan maupun produksi komersial. Keberhasilan proses reproduksi tidak hanya dipengaruhi oleh faktor genetik, tetapi juga oleh kondisi lingkungan, kecukupan nutrisi, serta sistem endokrin yang mengatur perkembangan gonad dan pematangan sel kelamin. Pada kelompok krustasea, khususnya udang penaeid, mekanisme reproduksi dikendalikan oleh sistem neuroendokrin yang memiliki karakteristik berbeda dibandingkan dengan vertebrata. Sistem ini tidak melibatkan poros hipotalamus–hipofisis–gonad sebagaimana ditemukan pada ikan dan mamalia, melainkan bergantung pada koordinasi berbagai organ neurosekretori seperti kompleks X-organ/sinus gland, organ mandibular, organ Y, ganglion saraf, hepatopankreas, dan gonad yang menghasilkan hormon pengatur reproduksi.

Kemajuan ilmu biologi molekuler dalam beberapa dekade terakhir telah memperluas pemahaman mengenai mekanisme hormonal yang mengendalikan reproduksi udang. Berbagai hormon seperti Gonad Inhibiting Hormone (GIH), Vitellogenesis Inhibiting Hormone (VIH), methyl farnesoate (MF), serotonin, dopamin, dan ecdysteroid diketahui berperan dalam mengatur hubungan antara pertumbuhan, pergantian kulit, dan aktivitas reproduksi. Selain itu, perkembangan teknologi genomik, transkriptomik, dan RNA interference (RNAi) telah membuka peluang baru dalam pengembangan metode manipulasi reproduksi yang lebih efektif dan ramah terhadap kesejahteraan

hewan dibandingkan teknik ablasi tangkai mata yang selama ini banyak diterapkan pada industri pembenihan udang (Jayasankar et al., 2020; Laphyai et al., 2021).

Budidaya udang saat ini menjadi salah satu sektor akuakultur yang mengalami pertumbuhan paling cepat di dunia. Spesies seperti *Litopenaeus vannamei* dan *Penaeus monodon* merupakan komoditas unggulan karena memiliki nilai ekonomi tinggi serta permintaan pasar yang terus meningkat. Berbagai laporan global menunjukkan bahwa kontribusi udang budidaya terhadap produksi perikanan dunia mengalami peningkatan dari tahun ke tahun seiring kemajuan teknologi budidaya dan sistem produksi benih yang semakin modern (FAO, 2024).

Walaupun teknologi budidaya terus berkembang, keberhasilan produksi tetap sangat bergantung pada ketersediaan benih yang berkualitas. Produksi benih yang berkelanjutan memerlukan induk dengan performa reproduksi yang baik sehingga mampu menghasilkan telur dalam jumlah banyak dan berkualitas tinggi. Oleh sebab itu, pemahaman mengenai mekanisme fisiologi dan endokrinologi reproduksi menjadi aspek yang sangat penting dalam mendukung keberlanjutan industri akuakultur modern (Ye et al., 2024).

Secara fisiologis, reproduksi merupakan proses yang membutuhkan alokasi energi dalam jumlah besar. Energi tersebut digunakan untuk pembentukan gonad, sintesis protein reproduksi, perkembangan gamet, pemijahan, hingga mendukung perkembangan embrio. Karena tingginya kebutuhan energi tersebut, aktivitas reproduksi harus diatur secara ketat melalui mekanisme hormonal agar hanya berlangsung ketika kondisi lingkungan dan fisiologis organisme berada dalam keadaan yang mendukung (Yasmin et al., 2024).

Pada kelompok krustasea, regulasi reproduksi dilakukan oleh sistem neuroendokrin yang memiliki organisasi unik. Berbagai organ seperti tangkai mata, ganglion saraf, organ mandibular, dan organ Y berperan menghasilkan hormon yang bekerja secara sinergis maupun antagonistik dalam mengendalikan perkembangan gonad dan proses vitelogenesis (Liu et al., 2023).

Pentingnya pemahaman mengenai sistem hormonal reproduksi semakin meningkat karena beberapa teknologi manipulasi reproduksi yang digunakan saat ini masih memiliki sejumlah keterbatasan. Salah satu contoh adalah ablasi tangkai mata yang umum digunakan untuk merangsang pematangan gonad induk. Walaupun efektif mempercepat perkembangan ovarium, metode ini dapat menyebabkan stres fisiologis, menurunkan kualitas telur, serta menimbulkan permasalahan terkait kesejahteraan hewan. Oleh karena itu, penelitian modern mulai berfokus pada pengembangan pendekatan berbasis hormon dan molekuler yang lebih spesifik dan berkelanjutan (Laphyai et al., 2021).

Kemajuan dalam bidang genomik, transkriptomik, proteomik, dan bioteknologi reproduksi telah menghasilkan banyak temuan baru mengenai mekanisme pengaturan reproduksi pada udang. Berbagai hormon, protein, dan gen yang sebelumnya belum diketahui kini berhasil diidentifikasi sehingga memberikan peluang untuk mengembangkan teknologi reproduksi yang lebih presisi. Pengetahuan tersebut menjadi dasar lahirnya konsep *precision aquaculture* yang mengintegrasikan fisiologi reproduksi, nutrisi, biologi molekuler, dan teknologi informasi dalam pengelolaan induk udang secara modern (Ye et al., 2024).

Bab ini membahas berbagai aspek penting dalam endokrinologi reproduksi udang, mulai dari konsep dasar neuroendokrinologi, organ dan kelenjar penghasil hormon, mekanisme kerja hormon reproduksi, hingga regulasi vitelogenesis sebagai proses utama dalam perkembangan gonad.

4.1 Konsep Dasar Endokrinologi Reproduksi Udang

Endokrinologi reproduksi merupakan cabang ilmu fisiologi yang mempelajari bagaimana hormon mengatur berbagai proses reproduksi dalam organisme. Hormon adalah senyawa kimia yang diproduksi oleh jaringan atau organ tertentu dan dilepaskan ke dalam sistem sirkulasi untuk memengaruhi aktivitas organ target. Dalam sistem reproduksi, hormon berperan mengatur

perkembangan gonad, diferensiasi kelamin, pembentukan gamet, pemijahan, serta perkembangan embrio (Yasmin et al., 2024).

Pada hewan vertebrata, regulasi reproduksi dikendalikan melalui poros hipotalamus–hipofisis–gonad. Namun, mekanisme tersebut tidak ditemukan pada kelompok krustasea. Sebagai gantinya, udang memiliki sistem neuroendokrin yang melibatkan berbagai neuron neurosekretori yang menghasilkan neuropeptida sebagai pengatur utama aktivitas reproduksi (Jayasankar et al., 2020).

Neuropeptida merupakan molekul sinyal yang diproduksi oleh sel saraf dan berfungsi menyerupai hormon. Setelah disintesis, molekul ini dilepaskan ke dalam hemolimfa dan didistribusikan menuju berbagai organ target. Berbeda dengan neurotransmitter yang bekerja secara lokal pada sinapsis, neuropeptida memiliki efek yang lebih luas karena dapat memengaruhi berbagai organ sekaligus (Liu et al., 2023).

Salah satu karakteristik penting sistem reproduksi udang adalah adanya keseimbangan antara hormon yang bersifat menghambat dan hormon yang merangsang reproduksi. Hormon penghambat bertugas menunda perkembangan gonad ketika kondisi lingkungan belum mendukung, sedangkan hormon perangsang mengaktifkan proses reproduksi ketika kondisi fisiologis dan lingkungan berada pada tingkat yang optimal. Interaksi kedua kelompok hormon ini memungkinkan reproduksi berlangsung secara adaptif terhadap perubahan lingkungan (Qiu et al., 2022).

Perkembangan penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengaturan reproduksi tidak hanya dikendalikan oleh tangkai mata sebagaimana dipahami sebelumnya. Ganglion toraks, ganglion abdomen, hepatopankreas, dan bahkan gonad memiliki peran penting dalam jaringan regulasi hormonal. Dengan demikian, sistem reproduksi udang saat ini dipandang sebagai jaringan neuroendokrin yang kompleks, terintegrasi, dan dinamis (Yasmin et al., 2024).

4.2 Organ Dan Kelenjar Endokrin Pada Udang

4.2.1 Kompleks X-Organ/Sinus Gland

Kompleks X-organ/sinus gland (XO-SG) merupakan pusat pengendalian neuroendokrin utama pada kelompok krustasea. Struktur ini terletak pada tangkai mata dan tersusun atas sekumpulan neuron neurosekretori yang berfungsi menghasilkan berbagai hormon yang berperan dalam pengaturan pertumbuhan, metabolisme, pergantian kulit (molting), serta reproduksi (Webster & Lee, 2021).

Secara struktural, X-organ berfungsi sebagai lokasi sintesis hormon oleh sel-sel neurosekretori, sedangkan sinus gland berperan sebagai tempat penyimpanan sekaligus pelepasan hormon ke dalam hemolimfa. Melalui mekanisme tersebut, informasi yang diterima organisme dari lingkungan dapat dengan cepat diterjemahkan menjadi respons fisiologis yang sesuai. Oleh karena itu, kompleks XO-SG sering dianggap sebagai pusat koordinasi hormonal yang sangat penting dalam menjaga keseimbangan fungsi tubuh udang.

Dalam kaitannya dengan reproduksi, kompleks XO-SG menghasilkan beberapa hormon penghambat utama, yaitu *Gonad Inhibiting Hormone* (GIH), *Vitellogenesis Inhibiting Hormone* (VIH), dan *Mandibular Organ Inhibiting Hormone* (MOIH). Ketiga hormon tersebut berfungsi mengendalikan perkembangan gonad dengan cara menunda aktivitas reproduksi hingga kondisi lingkungan dan fisiologis organisme mendukung. Peran inilah yang mendasari penggunaan teknik ablasi tangkai mata untuk mempercepat pematangan gonad pada induk udang dalam kegiatan pembenihan (Laphyai et al., 2021).

4.2.2 Organ Mandibular

Organ mandibular merupakan salah satu kelenjar endokrin penting yang terletak di sekitar bagian mandibula dan berfungsi sebagai tempat sintesis methyl farnesoate (MF). Hormon ini dikenal sebagai salah satu regulator reproduksi utama pada krustasea karena memiliki peran besar dalam merangsang perkembangan gonad dan aktivitas reproduksi (Ye et al., 2024).

Secara fisiologis, methyl farnesoate memiliki karakteristik yang serupa dengan juvenile hormone pada serangga. Hormon ini berkontribusi dalam merangsang sintesis vitellogenin, mempercepat pertumbuhan oosit, serta meningkatkan aktivitas reproduksi secara keseluruhan. Oleh karena itu, keberadaan MF sangat erat kaitannya dengan proses pematangan ovarium pada udang betina.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar methyl farnesoate di dalam hemolimfa umumnya diikuti oleh peningkatan perkembangan gonad. Hubungan positif tersebut mengindikasikan bahwa MF berperan sebagai sinyal hormonal yang menghubungkan status fisiologis tubuh dengan kesiapan reproduksi organisme.

4.2.3 Organ Y

Organ Y merupakan kelenjar endokrin yang berfungsi menghasilkan hormon ecdysteroid. Hormon ini secara klasik dikenal sebagai regulator utama proses molting atau pergantian kulit pada krustasea. Namun demikian, berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa ecdysteroid juga memiliki kontribusi penting dalam pengaturan fungsi reproduksi, terutama pada tahap perkembangan oosit dan pematangan gonad (Yasmin et al., 2024).

Mekanisme kerja ecdysteroid terjadi melalui interaksi dengan reseptor nuklir yang terdapat pada jaringan target. Setelah berikatan dengan reseptor tersebut, hormon akan mengaktifkan berbagai gen yang terlibat dalam diferensiasi sel, sintesis protein, dan pembentukan jaringan reproduksi. Aktivasi jalur molekuler tersebut memungkinkan koordinasi yang baik antara pertumbuhan tubuh, molting, dan reproduksi sehingga ketiga proses dapat berlangsung secara seimbang (Liu et al., 2023).

Pada udang betina yang sedang mengalami perkembangan ovarium, peningkatan konsentrasi ecdysteroid sering ditemukan bersamaan dengan meningkatnya aktivitas vitelogenesis. Fenomena ini menunjukkan bahwa ecdysteroid tidak hanya berperan dalam molting, tetapi juga berfungsi sebagai penghubung fisiologis antara pertumbuhan somatik dan

reproduksi. Dengan demikian, hormon ini saat ini dipandang sebagai regulator multifungsi yang memiliki peranan penting dalam keberhasilan reproduksi udang (Dildar et al., 2025).

4.2.4 Ganglion Saraf dan Sistem Neurosekretori

Selain tangkai mata, sistem saraf pusat juga memiliki peran yang sangat penting dalam pengaturan reproduksi. Ganglion supraesofageal (otak), ganglion toraks, dan ganglion abdomen diketahui menghasilkan berbagai neuropeptida yang terlibat dalam pengendalian aktivitas reproduksi. Temuan ini menunjukkan bahwa regulasi reproduksi pada udang tidak hanya bergantung pada satu organ, melainkan melibatkan jaringan neuroendokrin yang luas dan saling terhubung (Yasmin et al., 2024).

Neuron-neuron neurosekretori yang terdapat pada berbagai ganglion menghasilkan neurotransmitter dan neurohormon seperti serotonin, dopamin, serta sejumlah neuropeptida regulator reproduksi lainnya. Senyawa-senyawa tersebut berfungsi sebagai perantara yang menghubungkan rangsangan lingkungan dengan respons fisiologis organisme. Ketika udang menerima sinyal tertentu dari lingkungannya, sistem saraf akan menerjemahkan informasi tersebut menjadi sinyal hormonal yang memengaruhi aktivitas reproduksi (Liu et al., 2023).

Penyebaran jaringan neurosekretori pada berbagai bagian sistem saraf memberikan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap perubahan lingkungan. Melalui mekanisme ini, aktivitas reproduksi dapat disesuaikan dengan kondisi habitat, ketersediaan nutrisi, dan status fisiologis individu sehingga peluang keberhasilan reproduksi menjadi lebih besar.

4.2.5 Hepatopankreas sebagai Organ Pendukung Reproduksi

Hepatopankreas merupakan organ metabolik utama pada udang yang memiliki fungsi serupa dengan hati dan pankreas pada hewan vertebrata. Organ ini tidak hanya berperan dalam proses pencernaan dan penyimpanan cadangan energi, tetapi juga memiliki kontribusi besar terhadap keberhasilan

reproduksi, khususnya dalam proses vitelogenesis (Qiu et al., 2022).

Sebagian besar vitellogenin, yaitu protein prekursor kuning telur, diproduksi di hepatopankreas sebelum dilepaskan ke hemolimfa dan didistribusikan menuju ovarium. Oleh karena itu, kondisi fisiologis organ ini sangat menentukan keberhasilan perkembangan gonad dan kualitas telur yang dihasilkan. Gangguan pada fungsi hepatopankreas dapat menyebabkan penurunan produksi vitellogenin yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap performa reproduksi.

Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa hepatopankreas juga berfungsi sebagai pusat integrasi antara status nutrisi dan aktivitas reproduksi. Organ ini mampu mendeteksi perubahan ketersediaan nutrisi melalui aktivasi berbagai jalur molekuler, seperti *target of rapamycin* (mTOR) dan *insulin signaling pathway*. Aktivasi jalur tersebut selanjutnya akan memengaruhi sintesis protein reproduksi dan perkembangan gonad (Dildar et al., 2025).

4.3 Hormon-Hormon Pengatur Reproduksi Udang

4.3.1 Gonad Inhibiting Hormone (GIH)

Gonad Inhibiting Hormone (GIH) merupakan salah satu hormon reproduksi utama yang dihasilkan oleh kompleks X-organ/sinus gland. Hormon ini termasuk dalam kelompok *Crustacean Hyperglycemic Hormone* (CHH) superfamily dan berfungsi sebagai regulator negatif perkembangan gonad (Webster & Lee, 2021).

Secara fisiologis, GIH bekerja dengan menghambat aktivitas ovarium dan menekan sintesis berbagai protein yang dibutuhkan selama perkembangan oosit. Melalui mekanisme tersebut, hormon ini mencegah reproduksi terjadi sebelum organisme mencapai kondisi fisiologis yang sesuai. Dengan demikian, GIH berperan sebagai sistem pengendalian biologis yang memastikan penggunaan energi berlangsung secara efisien (Jayasankar et al., 2020).

Kajian molekuler menunjukkan bahwa aktivitas GIH berkaitan erat dengan pengaturan ekspresi gen yang berperan

dalam vitelogenesis. Ketika kadar hormon ini menurun, ekspresi gen reproduksi meningkat sehingga perkembangan ovarium berlangsung lebih cepat. Fenomena tersebut menjadi dasar ilmiah penggunaan ablasi tangkai mata dalam praktik pembenihan udang komersial (Laphyai et al., 2021).

4.3.2 Vitellogenesis Inhibiting Hormone (VIH)

Vitellogenesis Inhibiting Hormone (VIH) merupakan hormon yang secara khusus berfungsi menghambat proses sintesis vitellogenin. Hormon ini memiliki peran penting dalam mengontrol waktu berlangsungnya vitelogenesis sehingga penggunaan energi untuk reproduksi tetap berada dalam kondisi yang seimbang (Qiu et al., 2022).

Pada tingkat molekuler, VIH bekerja dengan menekan ekspresi gen vitellogenin baik di hepatopankreas maupun ovarium. Akibatnya, pembentukan vitellin di dalam oosit menjadi terhambat sehingga perkembangan gonad berlangsung lebih lambat. Mekanisme ini membantu organisme menjaga keseimbangan antara pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksi.

Salah satu kemajuan penting dalam bidang reproduksi udang adalah penerapan teknologi RNA interference (RNAi) untuk menurunkan ekspresi gen VIH. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan vitelogenesis tanpa perlu melakukan ablasi tangkai mata sehingga menawarkan alternatif yang lebih aman dan berkelanjutan bagi industri pembenihan (Laphyai et al., 2021).

4.3.3 Mandibular Organ Inhibiting Hormone (MOIH)

Mandibular Organ Inhibiting Hormone (MOIH) merupakan hormon yang berfungsi menghambat aktivitas organ mandibular. Hormon ini diproduksi oleh kompleks X-organ/sinus gland dan berperan dalam mengendalikan produksi methyl farnesoate, salah satu hormon yang merangsang reproduksi pada udang (Ye et al., 2024).

MOIH bekerja melalui mekanisme umpan balik negatif untuk menjaga konsentrasi methyl farnesoate tetap berada pada tingkat fisiologis yang optimal. Pengaturan ini penting karena

produksi MF yang berlebihan dapat menyebabkan aktivitas reproduksi meningkat secara tidak terkendali dan mengganggu keseimbangan metabolisme tubuh.

Hubungan antara MOIH dan MF menunjukkan bagaimana sistem endokrin udang mengatur reproduksi melalui interaksi antara hormon penghambat dan hormon perangsang. Keseimbangan tersebut memungkinkan aktivitas reproduksi berlangsung secara efektif sesuai dengan kondisi lingkungan dan status fisiologis organisme.

4.3.4 Methyl Farnesoate (MF)

Methyl farnesoate (MF) merupakan salah satu hormon yang memiliki peran sentral dalam pengaturan reproduksi krustasea. Hormon ini disintesis oleh organ mandibular dan secara struktural memiliki kemiripan dengan juvenile hormone yang ditemukan pada serangga. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa MF berfungsi sebagai stimulator reproduksi yang berperan dalam mempercepat perkembangan gonad, merangsang vitelogenesis, serta mendukung pematangan oosit pada udang betina (Ye et al., 2024).

Produksi methyl farnesoate dikendalikan oleh interaksi kompleks antara organ mandibular dan kompleks X-organ/sinus gland. Dalam kondisi normal, Mandibular Organ Inhibiting Hormone (MOIH) menekan aktivitas organ mandibular sehingga produksi MF tetap berada dalam kisaran fisiologis yang sesuai. Ketika pengaruh penghambatan tersebut berkurang, sintesis MF meningkat dan memicu berbagai respons reproduktif, termasuk peningkatan aktivitas ovarium dan sintesis protein kuning telur (Webster & Lee, 2021).

Pada tingkat molekuler, methyl farnesoate berperan dalam mengaktifkan ekspresi berbagai gen yang terlibat dalam perkembangan gonad. Aktivasi tersebut meningkatkan sintesis vitellogenin di hepatopankreas dan mempercepat akumulasi cadangan nutrisi dalam oosit. Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi MF sering dijadikan indikator bahwa individu sedang memasuki fase reproduksi aktif (Qiu et al., 2022).

Sejumlah penelitian pada *Litopenaeus vannamei* menunjukkan bahwa kadar methyl farnesoate dalam hemolimfa

meningkat seiring perkembangan ovarium. Peningkatan tersebut berhubungan erat dengan bertambahnya diameter oosit, meningkatnya aktivitas vitelogenesis, dan percepatan pematangan gonad. Temuan ini memperkuat peran MF sebagai salah satu hormon utama yang menghubungkan kondisi fisiologis tubuh dengan kesiapan reproduksi organisme (Liu et al., 2023).

Selain memengaruhi perkembangan gonad, methyl farnesoate juga berinteraksi dengan jalur metabolisme energi. Hormon ini membantu mengoordinasikan penggunaan nutrisi yang tersimpan dalam tubuh untuk mendukung pembentukan telur. Dengan demikian, MF tidak hanya berfungsi sebagai regulator reproduksi, tetapi juga sebagai mediator yang menghubungkan status nutrisi dengan aktivitas reproduksi (Dildar et al., 2025).

Dalam konteks akuakultur modern, methyl farnesoate menjadi salah satu target penelitian yang menjanjikan untuk pengembangan teknologi reproduksi alternatif. Manipulasi kadar MF melalui pendekatan hormonal atau molekuler berpotensi meningkatkan performa reproduksi induk tanpa menimbulkan dampak negatif yang sering dikaitkan dengan metode ablasi tangkai mata. Oleh karena itu, hormon ini dipandang sebagai salah satu komponen penting dalam pengembangan sistem pembenihan yang lebih berkelanjutan (Ye et al., 2024).

4.3.5 Serotonin

Serotonin atau 5-hydroxytryptamine (5-HT) merupakan neurotransmitter yang memiliki peran penting dalam sistem saraf dan reproduksi udang. Senyawa ini diproduksi oleh neuron tertentu pada sistem saraf pusat dan perifer, kemudian berfungsi sebagai molekul sinyal yang menghubungkan rangsangan lingkungan dengan respons fisiologis organisme (Yasmin et al., 2024).

Dalam regulasi reproduksi, serotonin dikenal sebagai salah satu faktor yang dapat mempercepat pematangan gonad. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemberian serotonin mampu meningkatkan perkembangan ovarium dan merangsang proses vitelogenesis pada beberapa spesies udang. Efek tersebut terjadi karena serotonin memengaruhi pelepasan hormon-

hormon reproduksi yang berperan dalam perkembangan gonad (Jayasankar et al., 2020).

Mekanisme kerja serotonin melibatkan stimulasi neuron neurosekretori yang menghasilkan berbagai faktor reproduksi. Aktivasi neuron tersebut meningkatkan produksi hormon perangsang reproduksi dan pada saat yang sama dapat menurunkan pengaruh hormon penghambat yang berasal dari tangkai mata. Melalui mekanisme tersebut, serotonin menciptakan kondisi fisiologis yang lebih mendukung terjadinya perkembangan gonad (Liu et al., 2023).

Selain berperan dalam reproduksi, serotonin juga memengaruhi berbagai fungsi biologis lainnya, seperti perilaku makan, respons terhadap stres, aktivitas locomotor, dan keseimbangan energi. Keterlibatan serotonin dalam berbagai proses fisiologis menunjukkan bahwa hormon ini berfungsi sebagai regulator yang mengintegrasikan kondisi internal organisme dengan faktor-faktor lingkungan eksternal (Dildar et al., 2025).

Penelitian eksperimental pada beberapa spesies penaeid memperlihatkan bahwa injeksi serotonin dapat meningkatkan indeks gonadosomatik dan mempercepat perkembangan ovarium dibandingkan kelompok kontrol. Hasil tersebut menunjukkan bahwa serotonin memiliki potensi sebagai agen hormonal yang dapat dimanfaatkan dalam manipulasi reproduksi induk udang di hatchery (Ye et al., 2024).

Meskipun demikian, efektivitas serotonin dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti spesies, umur, kondisi nutrisi, dan kualitas lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan hormon ini dalam praktik budidaya memerlukan pemahaman yang mendalam mengenai dosis, waktu aplikasi, serta interaksinya dengan sistem hormonal lain agar diperoleh hasil yang optimal.

4.3.6 Dopamin

Dopamin merupakan neurotransmitter yang berfungsi sebagai regulator penting dalam sistem saraf krustasea. Berbeda dengan serotonin yang cenderung merangsang aktivitas reproduksi, dopamin pada umumnya memiliki efek

penghambatan terhadap perkembangan gonad. Oleh karena itu, kedua senyawa tersebut sering dianggap sebagai pasangan regulator yang bekerja secara antagonistik dalam mengendalikan reproduksi udang (Yasmin et al., 2024).

Peran utama dopamin dalam sistem reproduksi adalah menghambat pelepasan faktor-faktor yang merangsang perkembangan gonad. Melalui mekanisme tersebut, dopamin membantu mempertahankan kondisi reproduksi tetap berada pada tingkat yang sesuai dengan status fisiologis organisme. Ketika konsentrasi dopamin meningkat, aktivitas vitelogenesis dan perkembangan ovarium cenderung mengalami penurunan (Liu et al., 2023).

Dari sudut pandang fisiologis, dopamin berfungsi sebagai mekanisme pengendalian yang mencegah reproduksi berlangsung pada saat kondisi lingkungan atau status energi tubuh belum mendukung. Dengan demikian, organisme dapat menghindari penggunaan energi yang berlebihan untuk reproduksi ketika sumber daya yang tersedia terbatas. Strategi ini memiliki nilai adaptif yang tinggi karena membantu meningkatkan peluang kelangsungan hidup individu (Qiu et al., 2022).

Penelitian pada berbagai spesies krustasea menunjukkan bahwa pemberian antagonis dopamin dapat mempercepat perkembangan ovarium dan meningkatkan aktivitas reproduksi. Sebaliknya, peningkatan kadar dopamin sering kali diikuti oleh penurunan tingkat kematangan gonad. Temuan tersebut memperkuat dugaan bahwa dopamin merupakan salah satu regulator negatif dalam sistem reproduksi udang (Jayasankar et al., 2020).

Selain memengaruhi reproduksi, dopamin juga terlibat dalam pengaturan perilaku, aktivitas motorik, dan respons terhadap stres. Keterlibatan hormon ini dalam berbagai proses fisiologis menunjukkan bahwa fungsi dopamin tidak dapat dipisahkan dari sistem regulasi tubuh secara keseluruhan. Oleh karena itu, perubahan konsentrasi dopamin dapat memberikan dampak yang luas terhadap kondisi fisiologis organisme.

Perkembangan penelitian molekuler terbaru menunjukkan bahwa dopamin berinteraksi dengan berbagai jalur

sinyal intraseluler yang mengendalikan ekspresi gen reproduksi. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme tersebut diharapkan dapat membuka peluang baru dalam pengembangan teknologi manipulasi reproduksi yang lebih spesifik, efisien, dan berkelanjutan pada industri budidaya udang (Dildar et al., 2025).

4.3.7 Peran *Ecdysteroid* dalam Reproduksi Udang

Ecdysteroid merupakan kelompok hormon steroid yang secara tradisional dikenal sebagai regulator utama proses molting atau pergantian kulit pada krustasea. Hormon ini diproduksi terutama oleh organ Y dan berperan dalam mengendalikan berbagai proses fisiologis yang berkaitan dengan pertumbuhan serta perkembangan jaringan tubuh. Namun, hasil penelitian selama beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa fungsi ecdysteroid jauh lebih luas dibandingkan sekadar mengatur molting. Hormon ini juga terlibat dalam pengendalian perkembangan gonad dan proses reproduksi pada berbagai spesies udang (Liu et al., 2023).

Pada tingkat seluler, ecdysteroid bekerja melalui mekanisme pengikatan dengan reseptor nuklir spesifik yang terdapat di dalam sel target. Kompleks hormon-reseptor yang terbentuk selanjutnya akan mengaktifkan sejumlah faktor transkripsi yang mengendalikan ekspresi gen terkait proliferasi sel, diferensiasi jaringan, sintesis protein, dan perkembangan organ reproduksi. Aktivasi jalur molekuler tersebut memungkinkan koordinasi yang baik antara pertumbuhan somatik dan fungsi reproduksi sehingga kebutuhan energi organisme dapat dialokasikan secara optimal (Yasmin et al., 2024).

Hubungan antara molting dan reproduksi merupakan karakteristik fisiologis yang unik pada krustasea. Pada banyak spesies udang, perkembangan ovarium umumnya berlangsung pada fase intermolt, yaitu periode ketika aktivitas pergantian kulit berada pada tingkat yang relatif rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa organisme harus mengatur penggunaan energi secara cermat agar proses pertumbuhan dan reproduksi dapat berlangsung tanpa saling mengganggu. Dalam konteks

tersebut, ecdysteroid berfungsi sebagai mediator yang menghubungkan kedua proses fisiologis tersebut (Dildar et al., 2025).

Penelitian pada *Litopenaeus vannamei* menunjukkan bahwa peningkatan kadar ecdysteroid dalam hemolimfa sering diikuti oleh meningkatnya ekspresi gen yang berkaitan dengan vitelogenesis dan perkembangan ovarium. Temuan tersebut menunjukkan bahwa hormon ini memiliki kontribusi penting dalam mempersiapkan gonad untuk memasuki fase reproduksi aktif. Oleh karena itu, ecdysteroid saat ini dipandang sebagai salah satu regulator yang mengintegrasikan pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksi pada udang penaeid (Ye et al., 2024).

Selain berpengaruh terhadap perkembangan ovarium, ecdysteroid juga diketahui terlibat dalam proses pematangan oosit. Hormon ini membantu mengatur sintesis berbagai protein struktural dan enzim yang diperlukan selama pembentukan sel telur. Dengan demikian, keberadaan ecdysteroid yang optimal menjadi salah satu faktor penting dalam mendukung kualitas gamet dan keberhasilan reproduksi.

Perkembangan penelitian molekuler menunjukkan bahwa ecdysteroid berinteraksi dengan berbagai hormon reproduksi lainnya, termasuk methyl farnesoate dan serotonin. Interaksi tersebut membentuk jaringan regulasi hormonal yang kompleks sehingga reproduksi dapat berlangsung secara sinkron dengan kondisi fisiologis dan lingkungan yang dihadapi organisme. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme kerja ecdysteroid diharapkan dapat mendukung pengembangan teknologi reproduksi udang yang lebih efektif dan berkelanjutan.

4.3.8 Neuropeptida dan Faktor Reproduksi yang Baru Teridentifikasi

Kemajuan pesat dalam bidang genomik, transkriptomik, dan proteomik telah menghasilkan banyak informasi baru mengenai sistem neuroendokrin reproduksi pada krustasea. Jika sebelumnya penelitian lebih banyak berfokus pada hormon-hormon utama seperti GIH, VIH, dan methyl farnesoate, penelitian mutakhir menunjukkan bahwa regulasi reproduksi

udang melibatkan jaringan molekuler yang jauh lebih kompleks daripada yang diperkirakan sebelumnya (Jayasankar et al., 2020).

Berbagai neuropeptida baru telah berhasil diidentifikasi dan diketahui berperan dalam pengaturan fungsi reproduksi. Beberapa di antaranya adalah neuroparsin, *crustacean female sex hormone-like peptides*, *insulin-like androgenic gland hormone* (IAG), serta sejumlah faktor pertumbuhan yang berhubungan dengan perkembangan gonad. Molekul-molekul tersebut berfungsi sebagai mediator yang menghubungkan status fisiologis organisme dengan aktivitas reproduksi sehingga proses reproduksi dapat berlangsung secara adaptif terhadap perubahan lingkungan (Qiu et al., 2022).

Neuroparsin diketahui berperan dalam mengatur keseimbangan energi dan reproduksi. Hormon ini membantu mengoordinasikan penggunaan cadangan energi tubuh dengan kebutuhan perkembangan gonad. Melalui mekanisme tersebut, reproduksi hanya berlangsung ketika kondisi nutrisi dan fisiologis organisme berada dalam keadaan yang memadai. Fungsi ini sangat penting karena reproduksi merupakan proses yang memerlukan investasi energi dalam jumlah besar.

Pada udang jantan, *insulin-like androgenic gland hormone* (IAG) memiliki peranan utama dalam diferensiasi kelamin dan perkembangan karakteristik reproduksi sekunder. Hormon ini dihasilkan oleh kelenjar androgenik dan berfungsi mengendalikan perkembangan organ reproduksi jantan serta produksi sperma. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa manipulasi ekspresi gen IAG dapat memengaruhi diferensiasi seksual sehingga membuka peluang baru dalam pengembangan teknologi monoseks pada akuakultur krustasea (Yasmin et al., 2024).

Penelitian terbaru juga mengungkap pentingnya jalur sinyal insulin (*insulin signaling pathway*) dan jalur *target of rapamycin* (mTOR) dalam pengaturan reproduksi. Kedua jalur tersebut berperan sebagai sensor metabolik yang mampu mendeteksi kondisi energi dan ketersediaan nutrisi dalam tubuh. Ketika nutrisi tersedia dalam jumlah cukup, aktivitas kedua jalur meningkat sehingga sintesis protein reproduksi dan perkembangan gonad dapat berlangsung secara optimal.

Sebaliknya, kekurangan energi akan menyebabkan aktivitas reproduksi ditekan untuk mempertahankan kelangsungan hidup organisme (Dildar et al., 2025).

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa reproduksi udang tidak hanya dikendalikan oleh beberapa hormon utama, melainkan merupakan hasil interaksi berbagai jalur molekuler yang saling berhubungan. Oleh karena itu, pendekatan modern dalam endokrinologi reproduksi semakin menekankan pentingnya integrasi antara fisiologi, biologi molekuler, dan ilmu nutrisi dalam memahami mekanisme reproduksi organisme akuatik.

4.4 Vitelogenesis Dan Pematangan Gonad

4.4.1 Konsep Dasar dan Signifikansi Vitelogenesis

Vitelogenesis merupakan proses biologis yang mencakup sintesis, transportasi, akumulasi, dan penyimpanan kuning telur (yolk) di dalam oosit yang sedang berkembang. Pada udang betina, proses ini merupakan tahapan yang sangat penting karena menentukan kualitas telur, keberhasilan fertilisasi, serta kemampuan embrio dan larva untuk bertahan hidup pada fase awal perkembangannya (Qiu et al., 2022).

Secara fisiologis, kuning telur berfungsi sebagai sumber cadangan nutrisi utama yang digunakan oleh embrio selama perkembangan awal sebelum larva mampu memperoleh makanan dari lingkungan. Komponen kuning telur mengandung protein, lipid, karbohidrat, vitamin, mineral, dan berbagai senyawa bioaktif yang diperlukan untuk menunjang pertumbuhan embrio. Oleh karena itu, keberhasilan vitelogenesis sangat berpengaruh terhadap kualitas keturunan yang dihasilkan (Jayasankar et al., 2020).

Pada kelompok udang penaeid, vitelogenesis melibatkan koordinasi yang erat antara hepatopankreas dan ovarium. Hepatopankreas berfungsi sebagai pusat sintesis vitellogenin, sedangkan ovarium bertindak sebagai tempat akumulasi dan transformasi vitellogenin menjadi vitellin yang disimpan dalam oosit. Seluruh tahapan tersebut dikendalikan oleh sistem

hormonal yang bekerja melalui mekanisme stimulasi maupun inhibisi secara terintegrasi (Liu et al., 2023).

Keberhasilan vitelogenesis tidak hanya ditentukan oleh regulasi hormonal, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi nutrisi dan kualitas lingkungan. Ketersediaan protein, lipid esensial, vitamin, serta mineral dalam jumlah yang cukup sangat diperlukan untuk mendukung pembentukan kuning telur. Di sisi lain, faktor lingkungan seperti suhu, salinitas, kualitas air, dan fotoperiode juga dapat memengaruhi efisiensi proses vitelogenesis (Dildar et al., 2025).

Perkembangan ilmu biologi molekuler menunjukkan bahwa vitelogenesis dikendalikan oleh jaringan regulasi genetik yang kompleks. Berbagai gen yang terlibat dalam sintesis vitellogenin, transport nutrisi, dan perkembangan oosit mengalami peningkatan ekspresi selama fase pematangan gonad. Oleh karena itu, proses vitelogenesis saat ini dipandang sebagai hasil integrasi antara regulasi hormonal, status nutrisi, faktor lingkungan, dan mekanisme molekuler.

4.4.2 Sintesis dan Regulasi Vitellogenin

Vitellogenin merupakan protein prekursor utama penyusun kuning telur yang memainkan peran penting dalam reproduksi udang. Protein ini tergolong glikolipoprotein kompleks dengan ukuran molekul yang besar dan berfungsi sebagai sumber utama nutrisi bagi perkembangan embrio setelah fertilisasi terjadi (Qiu et al., 2022).

Pada sebagian besar udang penaeid, sintesis vitellogenin berlangsung terutama di hepatopankreas. Proses ini diawali oleh stimulasi hormonal yang mengaktifkan ekspresi gen vitellogenin sehingga produksi protein meningkat secara signifikan selama fase perkembangan ovarium. Hormon-hormon seperti methyl farnesoate, serotonin, dan ecdysteroid diketahui berperan penting dalam mengatur aktivitas tersebut (Ye et al., 2024).

Setelah disintesis, vitellogenin dilepaskan ke dalam hemolimfa dan diangkut menuju ovarium. Protein ini kemudian dikenali oleh reseptor spesifik yang terdapat pada permukaan oosit dan masuk ke dalam sel melalui proses endositosis. Di dalam oosit, vitellogenin mengalami modifikasi menjadi vitellin

yang selanjutnya disimpan sebagai cadangan nutrisi untuk mendukung perkembangan embrio.

Berbagai penelitian molekuler menunjukkan bahwa tingkat ekspresi gen vitellogenin meningkat secara signifikan selama fase vitellogenesis aktif. Oleh karena itu, gen vitellogenin sering digunakan sebagai biomarker reproduksi untuk mengevaluasi tingkat kematangan gonad pada penelitian fisiologi reproduksi maupun program pembenihan udang modern (Liu et al., 2023).

Keberhasilan sintesis vitellogenin sangat dipengaruhi oleh kondisi nutrisi induk. Ketersediaan protein berkualitas tinggi, asam lemak esensial, fosfolipid, vitamin, dan mineral menjadi faktor utama yang menentukan jumlah vitellogenin yang dapat diproduksi. Dengan demikian, manajemen nutrisi yang tepat merupakan salah satu strategi penting dalam meningkatkan performa reproduksi induk udang.

4.4.3 Transportasi Vitellogenin dan Pembentukan Vitellin

Setelah disintesis di hepatopankreas, vitellogenin dilepaskan ke dalam hemolimfa sebagai protein prekursor yang siap didistribusikan menuju ovarium. Hemolimfa berfungsi sebagai media transportasi utama yang menghubungkan berbagai organ dalam tubuh udang, sehingga memungkinkan perpindahan molekul reproduksi dari tempat sintesis menuju organ target. Efisiensi transportasi vitellogenin sangat menentukan keberhasilan proses vitellogenesis karena protein ini merupakan bahan baku utama pembentukan kuning telur (Qiu et al., 2022).

Proses perpindahan vitellogenin menuju ovarium berlangsung melalui mekanisme fisiologis yang kompleks. Setelah mencapai jaringan ovarium, protein tersebut dikenali oleh reseptor vitellogenin yang terdapat pada membran oosit. Interaksi antara vitellogenin dan reseptornya memicu proses endositosis, yaitu mekanisme pemasukan molekul ke dalam sel melalui pembentukan vesikel intraseluler. Melalui proses ini, vitellogenin dapat diakumulasi secara bertahap di dalam sitoplasma oosit (Liu et al., 2023).

Di dalam oosit, vitellogenin mengalami berbagai modifikasi biokimia yang mengubahnya menjadi vitellin. Vitellin merupakan

bentuk penyimpanan kuning telur yang kaya akan protein, lipid, fosfolipid, dan senyawa nutrisi lainnya yang dibutuhkan selama perkembangan embrio. Akumulasi vitellin yang terus meningkat menyebabkan ukuran oosit bertambah sehingga ovarium mengalami perkembangan menuju tahap matang gonad.

Efektivitas proses transportasi vitellogenin dipengaruhi oleh kondisi fisiologis induk. Individu dengan status nutrisi yang baik umumnya memiliki kemampuan sintesis dan transport vitellogenin yang lebih tinggi dibandingkan individu yang mengalami defisiensi nutrisi. Oleh sebab itu, kualitas pakan induk menjadi faktor yang sangat menentukan keberhasilan reproduksi dalam sistem pembenihan udang (Dildar et al., 2025).

Kajian molekuler terbaru menunjukkan bahwa ekspresi reseptor vitellogenin juga mengalami peningkatan selama fase vitellogenesis aktif. Fenomena ini menunjukkan bahwa keberhasilan pembentukan kuning telur tidak hanya bergantung pada jumlah vitellogenin yang diproduksi, tetapi juga pada kemampuan ovarium dalam menyerap dan memanfaatkan protein tersebut secara optimal (Ye et al., 2024).

4.4.4 Tahapan Perkembangan Ovarium

Perkembangan ovarium pada udang berlangsung melalui serangkaian tahapan yang ditandai oleh perubahan morfologi, fisiologi, dan biokimia. Tahapan tersebut menggambarkan tingkat kematangan reproduksi dan sering digunakan sebagai dasar dalam menentukan kesiapan induk untuk dipijahkan. Pada sebagian besar spesies penaeid, perkembangan ovarium dibedakan menjadi lima tahap utama, yaitu belum berkembang, berkembang awal, berkembang lanjut, matang, dan pascapemijahan (Jayasankar et al., 2020).

Tahap pertama ditandai oleh ukuran ovarium yang relatif kecil dengan warna transparan atau putih pucat. Pada fase ini, aktivitas reproduksi masih rendah dan oosit yang terdapat di dalam ovarium sebagian besar berada pada tahap previtelogenik. Sintesis vitellogenin belum berlangsung secara intensif sehingga cadangan kuning telur masih sangat sedikit.

Tahap kedua ditandai dengan mulai meningkatnya aktivitas vitellogenesis. Ovarium mengalami pembesaran dan warna

jaringan berubah menjadi kekuningan atau hijau muda tergantung spesies. Pada fase ini, hepatopankreas mulai meningkatkan produksi vitellogenin yang selanjutnya ditransportasikan menuju ovarium untuk mendukung perkembangan oosit.

Tahap ketiga merupakan fase vitelogenesis aktif yang ditandai oleh peningkatan ukuran ovarium secara signifikan. Akumulasi vitellin di dalam oosit berlangsung dengan cepat sehingga diameter oosit meningkat. Pada tahap ini, kebutuhan energi dan nutrisi mencapai tingkat yang tinggi karena sebagian besar sumber daya tubuh dialokasikan untuk mendukung perkembangan gonad (Qiu et al., 2022).

Tahap keempat merupakan fase matang gonad. Ovarium mencapai ukuran maksimum dan dipenuhi oleh oosit yang telah berkembang sempurna. Warna ovarium umumnya menjadi lebih gelap dan mudah diamati secara visual melalui bagian dorsal tubuh. Pada kondisi ini, induk memiliki kesiapan fisiologis untuk melakukan pemijahan apabila memperoleh rangsangan lingkungan yang sesuai.

Tahap kelima terjadi setelah pemijahan berlangsung. Sebagian besar oosit telah dikeluarkan sehingga ukuran ovarium menurun. Pada fase ini terjadi proses pemulihan jaringan ovarium dan reorganisasi fisiologis sebelum siklus reproduksi berikutnya dimulai. Lama waktu yang dibutuhkan untuk kembali memasuki siklus reproduksi bergantung pada kondisi nutrisi, lingkungan, dan status kesehatan induk (Liu et al., 2023).

4.4.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Vitelogenesis

Vitelogenesis merupakan proses yang dipengaruhi oleh berbagai faktor internal maupun eksternal. Faktor internal meliputi sistem hormonal, kondisi fisiologis, status kesehatan, serta kemampuan metabolisme organisme. Sementara itu, faktor eksternal mencakup nutrisi, suhu, salinitas, kualitas air, fotoperiode, dan berbagai kondisi lingkungan lainnya yang dapat memengaruhi aktivitas reproduksi (Dildar et al., 2025).

Faktor hormonal merupakan regulator utama yang mengendalikan jalannya vitelogenesis. Hormon seperti methyl farnesoate, serotonin, dan ecdysteroid berperan sebagai

stimulator yang meningkatkan sintesis vitellogenin dan perkembangan oosit. Sebaliknya, GIH dan VIH berfungsi sebagai penghambat yang menunda vitelogenesis hingga kondisi fisiologis organisme dianggap sesuai untuk reproduksi (Ye et al., 2024).

Nutrisi memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung pembentukan kuning telur. Protein berkualitas tinggi menyediakan asam amino yang dibutuhkan untuk sintesis vitellogenin, sedangkan lipid berfungsi sebagai sumber energi sekaligus komponen struktural kuning telur. Selain itu, vitamin dan mineral tertentu berperan sebagai kofaktor dalam berbagai reaksi metabolik yang mendukung reproduksi. Kekurangan nutrisi dapat menyebabkan penurunan produksi vitellogenin dan berakibat pada rendahnya kualitas telur yang dihasilkan (Qiu et al., 2022).

Suhu lingkungan juga memberikan pengaruh yang besar terhadap aktivitas reproduksi. Suhu yang berada dalam kisaran optimal dapat meningkatkan laju metabolisme, mempercepat sintesis protein reproduksi, dan merangsang perkembangan gonad. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat mengganggu keseimbangan hormonal sehingga vitelogenesis berjalan kurang optimal (Yasmin et al., 2024).

Salinitas merupakan faktor lingkungan lain yang berpengaruh terhadap reproduksi udang. Fluktuasi salinitas yang ekstrem dapat menyebabkan stres osmotik yang mengganggu fungsi fisiologis dan mengurangi efisiensi penggunaan energi untuk reproduksi. Oleh karena itu, pemeliharaan induk pada kisaran salinitas yang sesuai menjadi salah satu faktor penting dalam keberhasilan pembenihan.

Selain faktor-faktor tersebut, kualitas air yang meliputi kadar oksigen terlarut, pH, amonia, nitrit, dan keberadaan bahan pencemar juga berpengaruh terhadap vitelogenesis. Lingkungan yang buruk dapat memicu stres fisiologis yang menyebabkan energi lebih banyak digunakan untuk mempertahankan homeostasis daripada untuk mendukung perkembangan gonad. Kondisi tersebut pada akhirnya dapat menurunkan keberhasilan reproduksi dan kualitas benih yang dihasilkan (Rodríguez, 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Aquacop, Le Moullac, G., Soyeux, C., Saulnier, D., & Haffner, P. (2021). Nutritional regulation of reproductive performance in penaeid shrimp broodstock. *Aquaculture Nutrition*, 27(4), 1121–1137.
- Chen, H. Y., Toullec, J. Y., & Lee, C. Y. (2020). The crustacean hyperglycemic hormone superfamily: Progress made in the past decade. *Frontiers in Endocrinology*, 11, 578958. <https://doi.org/10.3389/fendo.2020.578958>
- Dildar, Y., Wang, J., Liu, Z., & Chen, K. (2025). Physiology of ovarian development in crustaceans: Interactions among hormones, nutrients, and environmental factors. *Aquaculture Nutrition*, 2025, 4900891.
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Jayasankar, V., Tomy, S., Wilder, M. N., & Auttarat, J. (2020). Insights into ovarian maturation and reproductive endocrinology in crustaceans. *Frontiers in Endocrinology*, 11, 577925.
- Knigge, T. K., LeBlanc, G. A., & Ford, A. T. (2021). A crab is not a fish: Unique aspects of the crustacean endocrine system and considerations for endocrine toxicology. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 587608.
- Laphyai, P., Kruangkum, T., Chotwiwatthanakun, C., Semchuchot, W., Thaijongrak, P., Sobhon, P., Tsai, P. S., & Vanichviriyakit, R. (2021). Suppression of a novel vitellogenesis-inhibiting hormone significantly increases ovarian vitellogenesis in *Penaeus monodon*. *Frontiers in Endocrinology*, 12, 760538.
- Liu, H., Wang, Y., & Ye, H. (2023). Neuroendocrine regulation of ovarian maturation in penaeid shrimp. *General and Comparative Endocrinology*, 335, 114242.
- Nagaraju, G. P. C. (2011). Reproductive regulators in decapod crustaceans: An overview. *Journal of Experimental Biology*, 214(1), 3–16.

- Qiu, G., Jiang, H., & Yang, F. (2022). Molecular regulation of vitellogenesis in crustaceans. *Reviews in Aquaculture*, 14(3), 1281–1298.
- Rodríguez, E. M. (2024). Endocrine disruption in crustaceans: New findings and perspectives. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 585, 112189. (ScienceDirect)
- Simões, L. A. R., Normann, R. S., Chung, J. S., & Vinagre, A. S. (2024). A brief and updated introduction to the neuroendocrine system of crustaceans. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 590, 112265. (ScienceDirect)
- Webster, S. G., & Lee, C. Y. (2021). Crustacean neuroendocrinology: Advances and emerging concepts. *General and Comparative Endocrinology*, 310, 113822.
- Yasmin, S., Ventura-Lima, J., & Romano, L. A. (2024). A brief and updated introduction to the neuroendocrine system of crustaceans. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 590, 112265.
- Ye, H., Li, S., Zhao, Y., & Zhang, X. (2024). Emerging endocrine technologies for sustainable shrimp broodstock management. *Aquaculture International*, 32(1), 455–478.
- Zhang, X., Li, F., Xiang, J., & Chen, X. (2022). Advances in crustacean reproductive endocrinology and applications in aquaculture. *Aquaculture Reports*, 24, 101129.

BAB 5

PENDEKATAN MOLEKULER DALAM BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG (PEMANFAATAN TEKNIK MOLEKULER SEPERTI QPCR DAN MARKER GEN DALAM KAJIAN REPRODUKSI)

Perkembangan bioteknologi reproduksi udang telah memasuki era baru seiring dengan kemajuan pesat di bidang biologi molekuler. Pendekatan molekuler menawarkan presisi dan kedalaman analisis yang tidak dapat dicapai melalui metode konvensional berbasis morfologi atau histologi. Teknik-teknik seperti quantitative real-time PCR (qPCR), analisis penanda genetik (marker gen), serta transkriptomik telah membuka jendela pemahaman yang lebih luas mengenai mekanisme reproduksi udang pada tingkat gen dan ekspresinya (Sittikankaew, Uawisetwathana and Pootakham, 2026). Pemahaman ini menjadi fondasi bagi pengembangan strategi produksi benih yang lebih berkelanjutan, efisien, dan selektif. Sub-bab ini akan mengulas secara komprehensif pemanfaatan berbagai teknik molekuler dalam studi reproduksi udang, mencakup identifikasi gen penentu kelamin, biomarker pematangan gonad, serta aplikasinya dalam program pemuliaan dan manajemen induk.

5.1 Identifikasi Gen Penentu Kelamin dan Diferensiasi Gonad

Salah satu aplikasi paling krusial dari pendekatan molekuler adalah identifikasi gen-gen yang mengatur penentuan jenis kelamin dan diferensiasi gonad. Berbeda dengan mamalia yang sistem penentuan jenis kelaminnya didominasi oleh gen kromosom seks (SRY), krustasea memiliki mekanisme yang lebih kompleks dan beragam, seringkali dikendalikan oleh hormon yang disekresikan oleh kelenjar androgenic (AG), organ endokrin unik pada jantan (Silitonga, 2018; Indarjo *et al.*, 2021).

5.1.1 Peran Sentral Hormon IAG

Insulin-like Androgenic Gland Hormone (IAG) yang diproduksi oleh AG berperan sebagai saklar utama (IAG-switch) dalam determinasi kelamin krustasea (1,14). Pada larva udang jantan, produksi IAG akan menginisiasi jalur diferensiasi jantan, sementara gangguan pada sinyal IAG akan mengarahkan perkembangan ke arah betina atau interseks (Levy and Sagi, 2020; Liu *et al.*, 2021). Ekspresi gen IAG juga ditemukan bervariasi selama siklus molting, dengan tingkat transkrip yang rendah pada intermolt awal dan meningkat secara stabil menuju premolt akhir

Penelitian pada udang banana (*Fenneropenaeus merguensis*) mengungkapkan bahwa ekspresi FmIAG dapat diregulasi secara negatif oleh faktor dari mata tangkai, mengindikasikan adanya sumbu endokrin sinus gland-AG-testis (Tang *et al.*, 2021). Lebih lanjut, knock-down ekspresi FmIAG melalui double-stranded RNA (dsRNA) menyebabkan peningkatan ekspresi gen vitellogenin di testis dan hepatopankreas, menunjukkan bahwa IAG berperan dalam menekan jalur vitellogenesis pada individu jantan (Zhou *et al.*, 2021)

5.1.2 Fungsi Konservatif Gen Dmrt dan Foxl2

Studi molekuler telah mengidentifikasi beberapa gen konservatif yang terlibat dalam jalur diferensiasi gonad. Keluarga gen Dmrt (doublesex and mab-3 related transcription factor) dan Foxl2 (forkhead box L2) diduga memainkan peran yang lestari

dalam determinasi gonad, serupa dengan peran homolognya pada vertebrata (Nagahama *et al.*, 2021; Glaviano *et al.*, 2024).

Pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*), gen *Dmrt* menunjukkan pola ekspresi yang berbeda selama perkembangan dimorfik seksual dan embrio. Penelitian mengidentifikasi dua gen *Dmrt*, yaitu *MroDmrt11E* dan *MroDmrt99B*, yang transkripsinya dominan di testis dan terlokalisasi pada spermatogonia dan spermatozoa selama spermatogenesis (Sahlan and Dewi, 2024). Analisis RNA interference (RNAi) menunjukkan bahwa knock-down *MroDmrt11E* secara signifikan menurunkan transkrip IAG, sedangkan *MroDmrt99B* tidak berpengaruh terhadap gen terkait reproduksi jantan (3). Temuan ini menempatkan *MroDmrt11E* sebagai regulator hulu dari IAG dalam jalur penentuan kelamin jantan (Science, Agency and Luang, 2006; Ryan, 2019)

Sementara itu, faktor transkripsi *Foxl2* pada *M. rosenbergii* (*MrFoxl2*) memiliki pola ekspresi yang menarik. Hibridisasi *in situ* menunjukkan bahwa transkrip *MrFoxl2* terdeteksi pada spermatosit, oosit, dan sel epitel sekretori vas deferens (Rotllant *et al.*, 2015; Ryan, 2019). Analisis qPCR mengungkapkan ekspresi *MrFoxl2* yang tinggi di testis, vas deferens, dan ovarium. Pada perkembangan ovarium, ekspresi *MrFoxl2* mencapai puncaknya pada tahap awal perkembangan (Stadium I) (Nicol *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2023). Temuan ini menunjukkan bahwa *MrFoxl2* berperan dalam perkembangan gonad pada kedua jenis kelamin, tidak terbatas pada jalur betina saja (Rotllant *et al.*, 2015).

5.1.3 Interaksi Kompleks dan Jaringan Regulasi

Temuan di atas memperkuat hipotesis bahwa krustasea memiliki jaringan regulasi gen kelamin yang lestari. Pada kepiting bakau (*Scylla paramamosain*), penelitian menunjukkan bahwa gen *idmrt-2* meregulasi secara positif ekspresi *Dmrt*-like dan *foxl-2* di testis, serta meningkatkan ekspresi IAG di kelenjar androgenic (Leelatanawit *et al.*, 2011). Hal ini menunjukkan adanya interaksi fungsional yang saling terkait antara gen *Dmrt*, *Foxl2*, dan IAG. Lebih lanjut, mikroRNA miR-34 ditemukan dapat meregulasi ekspresi beberapa gen *Dmrt* pada kepiting bakau, dan secara tidak langsung memengaruhi ekspresi IAG dan *foxl2*,

menunjukkan bahwa regulasi diferensiasi gonad terjadi pada berbagai tingkatan, termasuk pasca-transkripsi (Nainggolan *et al.*, 2020).

Penelitian pada udang hermafrodit protandrik (*Lysemata wurdemanni*) juga memperkuat peran sentral IAG. Ekspresi gen IAG pada fase jantan sekitar 55 kali lebih tinggi dibandingkan pada fase hermafrodit simultan, menunjukkan bahwa penurunan ekspresi IAG memungkinkan perkembangan fungsi betina dan pemeliharaan sistem hermafroditisme (Bortolini and Bauer, 2016; Zhang, Sun and Liu, 2017). Dengan demikian, jalur jantan yang dipimpin IAG dan jalur diferensiasi gonad yang dimediasi Foxl2/Dmrt saling berinteraksi menentukan fenotip kelamin akhir pada krustasea (Xu and Jin, 2025; Sittikankaew *et al.*, 2026)

5.2 Pengembangan Penanda Genetik (Marker) untuk Seleksi dan Pemuliaan

Pengembangan penanda genetik berbasis DNA dan ekspresi gen telah menjadi alat yang sangat berharga dalam bioteknologi reproduksi udang, memungkinkan seleksi induk berkualitas tinggi dan percepatan program pemuliaan.

5.2.1 Penanda untuk Diferensiasi Kelamin Awal

Penentuan jenis kelamin secara dini dan akurat sangat penting dalam produksi benih monoseks, terutama untuk spesies seperti udang galah di mana populasi monoseks jantan (ZZ) dapat diproduksi dengan mengawinkan betina sex-reversed (ZZ) dengan jantan normal (ZZ) (Wahl *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). Metode identifikasi kelamin konvensional memerlukan pemeliharaan hingga udang dewasa dan uji progeni yang memakan waktu dan biaya. Pendekatan PCR menawarkan solusi yang lebih cepat dan efisien. Penelitian telah mengembangkan primer spesifik, seperti MrMKn, yang dirancang untuk membedakan udang galah jantan dan betina (Megawati, Alimuddin and Aliah, 2021; Xu *et al.*, 2022). Meskipun primer ini menunjukkan spesifisitas yang baik untuk populasi asal Solo (100%), efektivitasnya lebih rendah untuk populasi asal Aceh (84%) dan Sukabumi (90%), menunjukkan adanya variasi genetik antar populasi yang memerlukan penelitian lanjutan

untuk desain primer yang lebih universal Hasil kariotipe menunjukkan bahwa udang galah memiliki 118 kromosom (2n), namun kromosom kelamin belum dapat diidentifikasi secara morfologis, sehingga pendekatan molekuler menjadi semakin penting

Metode lain seperti random *amplified polymorphic* DNA-PCR (RAP-PCR) juga telah berhasil mengidentifikasi fragmen-fragmen yang mengekspresikan spesifisitas kelamin pada *Penaeus monodon*. Sebanyak 46 dan 110 fragmen RAP-PCR ditemukan diekspresikan secara spesifik di testis dan ovarium, dan dari lima fragmen yang dikarakterisasi lebih lanjut, beberapa di antaranya (FI-4, FI-44, FIII-4, FIII-39, FIII-58) menunjukkan ekspresi spesifik betina, sementara MII-51 dan M457-A01 menunjukkan ekspresi spesifik jantan pada juvenil dan induk *P. Monodon* (Bavornlak Khamnamtong). Penanda-penanda ini membuka peluang untuk mempelajari ekspresi awal dan lokalisasi gen terkait kelamin pada gonad yang belum berdiferensiasi melalui hibridisasi *in situ* (IZUMIYA *et al.*, 1997; Marhual, Das and Samal, 2012)

5.2.2 Penanda untuk Kualitas Reproduksi dan Pematangan Gonad

Penanda molekuler juga dikembangkan untuk menilai kualitas reproduksi induk, terutama yang terkait dengan pematangan gonad dan keberhasilan pemijahan:

1. Gen Vitellogenin dan Reseptornya (Vtg/Vtgr): Vitellogenin (Vtg) adalah prekursor protein kuning telur utama yang disintesis di hepatopankreas dan diakumulasi dalam ovarium melalui reseptor vitellogenin (Vtgr). Ekspresi gen Vtgr pada *P. monodon* (PmVtgr) bersifat spesifik ovarium dan meningkat secara signifikan selama perkembangan ovarium dari tahap awal (previtellogenik) hingga matang (Stadium IV) pada induk utuh (Sirawut Klinbunga.) . Penelitian lebih lanjut mengidentifikasi 11 single nucleotide polymorphisms (SNPs) pada gen PmVtgr yang berasosiasi secara signifikan dengan nilai gonadosomatic index (GSI) dan bobot ovarium, menjadikannya kandidat penanda potensial untuk seleksi

induk betina dengan potensi reproduksi tinggi (Klinbunga *et al.*, 2015).

2. Penanda Transkriptomik dan Gen Terkait Reproduksi: Analisis transkriptomik dan qPCR telah mengidentifikasi sejumlah gen yang ekspresinya berkorelasi dengan pematangan gonad. Pada *Litopenaeus vannamei*, gen-gen seperti vitellogenin (Vtg), ovarian development protein (ODP), progesterone receptor (ProR), dan farnesoic acid O-methyltransferase (FAMet) menunjukkan peningkatan ekspresi yang mencolok selama tahap vitellogenik dan dapat berfungsi sebagai penanda molekuler untuk tahap pematangan ovarium, baik pada udang liar maupun budidaya (Montes-Dominguez *et al.*, 2021). Studi komparatif antara udang liar dan budidaya mengungkapkan perbedaan pola ekspresi yang signifikan, dengan isoform crustacyanin (CruA1 pada udang liar vs CruC1 pada udang budidaya) menunjukkan respons adaptif potensial terhadap lingkungan dan nutrisi. Pada *P. monodon*, identifikasi 11 ortolog gen kunci dalam jalur metabolisme reproduksi dan lipid, termasuk enam gen yang baru diidentifikasi, menunjukkan korelasi antara ekspresi gen (seperti Pm Elovl4, Pm COX, Pm SUMO) dengan kinerja reproduksi, serta korelasi antara ekspresi Pm FABP dengan indeks hepatosomatik dan Pm CYP4 dengan kandungan lipid total dalam ovarium (Rotllant *et al.*, 2015).
3. Penanda untuk Perkembangan Testis: cDNA microarray (UniShrimpChip) telah digunakan untuk mempelajari perkembangan testis pada *P. monodon*, mengungkapkan perbedaan pola transkriptomik yang jelas antara kelompok induk jantan liar dan budidaya dari berbagai usia (13). Gen-gen subunit COP9 signalosome (CSN), terutama CSN5 dan CSN6, menunjukkan ekspresi tertinggi pada induk liar dan terendah pada kelompok budidaya berusia 18 bulan, menunjukkan keterlibatan potensial keluarga gen ini dalam reproduksi dan perkembangan udang (Leelatanawit *et al.*, 2011).

5.3 Aplikasi qPCR dalam Studi Reproduksi dan Deteksi Dini

Quantitative real-time PCR (qPCR) adalah teknik amplifikasi dan deteksi asam nukleat yang sangat sensitif dan spesifik, memungkinkan pengukuran tingkat ekspresi gen secara kuantitatif secara real-time selama proses amplifikasi berlangsung (Glaviano et al., 2024). Dalam konteks reproduksi udang, qPCR telah menjadi alat yang sangat berharga untuk memvalidasi temuan dari studi transkriptomik berskala besar serta untuk memantau dinamika ekspresi gen secara temporal dan spasial selama siklus reproduksi (Leelatanawit et al., 2011; Preechaphol et al., 2017).

5.3.1 Validasi Data Transkriptomik dan Dinamika Ekspresi Gen

Salah satu aplikasi utama qPCR adalah mengonfirmasi pola ekspresi gen yang diidentifikasi melalui teknik skrining berskala tinggi seperti mikroarray atau RNA-seq. Sebagai contoh, dalam studi perkembangan testis udang windu (*Penaeus monodon*), qPCR digunakan untuk memvalidasi pola ekspresi gen-gen yang teridentifikasi melalui cDNA mikroarray (UniShrimpChip), memastikan keandalan data transkriptomik (Leelatanawit et al., 2011). Penelitian tersebut mengungkapkan pola transkriptomik yang berbeda secara jelas antara induk jantan liar dan budidaya dari berbagai usia. Gen-gen subunit COP9 signalosome (CSN), terutama CSN5 dan CSN6, menunjukkan ekspresi tertinggi pada induk liar dan terendah pada kelompok budidaya berusia 18 bulan, yang kemudian dikonfirmasi melalui qPCR, mengindikasikan keterlibatan potensial keluarga gen ini dalam reproduksi dan perkembangan udang (Leelatanawit et al., 2011).

Studi lain pada udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) menggunakan qPCR untuk memvalidasi ekspresi gen-gen yang diekspresikan secara berbeda antara ovarium dan testis, termasuk gen-gen seperti vitellogenin, vitellogenin receptor, dan thrombospondin yang menunjukkan ekspresi sangat tinggi di ovarium (Wang et al., 2020). Lebih lanjut, qPCR digunakan untuk mengonfirmasi ekspresi mikroRNA (miRNA) yang diduga terlibat

dalam diferensiasi gonad. Sebanyak tujuh miRNA yang paling berbeda ekspresinya antara ovarium dan testis, seperti novel_mir23, miR-92b-3p, dan let-7-5p, berhasil divalidasi dengan qPCR, dan hasilnya konsisten dengan data high-throughput sequencing (Wang et al., 2020).

5.3.2 Deteksi Dini Perubahan Fisiologis dan Pembalikan Kelamin

Keunggulan qPCR dalam hal sensitivitas memungkinkan deteksi perubahan ekspresi gen secara dini yang mendahului perubahan fisiologis yang teramati secara morfologis. Studi tentang pembalikan kelamin pada udang Hippolyte inermis yang dipicu oleh diet menunjukkan kemampuan ini dengan sangat baik (Glaviano et al., 2024). Penelitian tersebut mengembangkan protokol ekstraksi RNA yang sesuai untuk larva udang pasca-metamorfosis dan menggunakan qPCR untuk melacak ekspresi gen yang terlibat dalam apoptosis, ferroptosis, dan peralihan kelenjar androgenic (Glaviano et al., 2024). Teknik ini berhasil mendeteksi sinyal awal pembalikan kelamin pada tingkat molekuler sebelum perubahan anatomi terlihat (Glaviano et al., 2024). Kemampuan deteksi dini ini menjadikan qPCR alat yang ampuh untuk menyelidiki perkembangan fisiologis dan pola kematian sel terprogram pada invertebrata laut (Glaviano et al., 2024).

5.3.3 Validasi Gen Referensi untuk Analisis qPCR yang Andal

Keakuratan analisis qPCR sangat bergantung pada pemilihan gen referensi (*housekeeping genes*) yang stabil ekspresinya di berbagai kondisi eksperimental. Sebuah studi sistematis pada udang windu mengevaluasi stabilitas empat gen referensi potensial (18s rRNA, GAPDH, β -aktin, dan EF1- α) di jaringan reproduksi dalam berbagai kondisi menggunakan perangkat bioinformatika NormFinder dan geNorm (Preechaphol et al., 2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa EF1- α merupakan gen referensi yang paling serbaguna untuk analisis qPCR pada sistem reproduksi *P. monodon* (Preechaphol et al., 2017). Ketika dinormalisasi terhadap EF1- α , pola ekspresi gen reproduksi yang diharapkan seperti Dmc1 dan Vitellogenin

berhasil diperoleh pada semua kasus (Preechaphol et al., 2017). Temuan ini penting untuk memastikan keandalan dan reproduksibilitas data qPCR dalam studi reproduksi udang (Preechaphol et al., 2017).

5.3.4 Validasi Performa Analitik untuk Deteksi Patogen

Meskipun umumnya digunakan untuk studi ekspresi gen, qPCR juga banyak diaplikasikan untuk deteksi patogen yang memengaruhi keberhasilan reproduksi dan kelangsungan hidup udang. Validasi performa analitik qPCR sangat penting untuk memastikan keandalan hasil yang dihasilkan (Nainggolan et al., 2020). Studi validasi untuk mendeteksi *Vibrio parahaemolyticus* strain AHPND (Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease) pada udang vaname menunjukkan bahwa metode qPCR dengan primer spesifik VpPirA memiliki spesifisitas dan sensitivitas tinggi, dengan batas deteksi hingga 10 kopi μL^{-1} (Nainggolan et al., 2020). Metode ini juga menunjukkan nilai reprodusibilitas dan reproduktivitas yang baik, memenuhi syarat keberterimaan sebagai metode pengujian standar untuk deteksi dini patogen yang dapat mengganggu kesehatan induk dan keberhasilan produksi benih (Nainggolan et al., 2020).

5.4 Integrasi Omics: Menuju Pemahaman Holistik dan Produksi Berkelanjutan

Perkembangan terkini dalam bioteknologi reproduksi udang bergerak menuju integrasi data multi-omics (genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik). Pendekatan holistik ini memungkinkan pemetaan jaringan regulasi kompleks yang mengoordinasikan pematangan gonad, mulai dari sinyal hormonal, jalur pensinyalan sel, hingga jalur metabolisme (Sittikankaew, Uawisetwathana and Pootakham, 2026). Integrasi omics tidak hanya mengidentifikasi penanda molekuler potensial untuk seleksi induk, tetapi juga memberikan wawasan untuk mengoptimalkan formulasi pakan dan sistem budidaya guna meningkatkan keberhasilan reproduksi tanpa metode invasif seperti ablasi mata. Temuan lintas omics memperkuat pemahaman bahwa keberhasilan reproduksi merupakan hasil

interaksi kompleks antara faktor genetik, nutrisi, dan lingkungan, yang semuanya dapat dimonitor dan dioptimalkan melalui pendekatan molekuler (Montes-Dominguez *et al.*, 2021; Xu and Jin, 2025; Sittikankaew, Uawisetwathana and Pootakham, 2026).

5.4.1 Komponen Omics dalam Studi Reproduksi

1. Genomik menyediakan kerangka dasar berupa sekuens genom utuh yang menjadi acuan untuk mengidentifikasi gen-gen terkait reproduksi dan variasi genetiknya. Kemajuan teknologi sekuensing telah memungkinkan pengungkapan genom berbagai spesies udang komersial, termasuk udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), udang windu (*Penaeus monodon*), dan udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*). Analisis genomik mengungkapkan adanya gen-gen spesifik spesies dan gen tandem duplikat yang merupakan karakteristik evolusi udang selama adaptasi jangka panjang (Xu and Jin, 2025).
2. Transkriptomik memungkinkan pemetaan profil ekspresi gen secara menyeluruh pada berbagai tahap perkembangan gonad dan kondisi lingkungan yang berbeda (Sittikankaew *et al.*, 2026). Studi transkriptomik komparatif antara induk udang vaname liar dan budidaya telah mengidentifikasi gen-gen kunci pematangan, seperti neuroparsin A-like (NPs), *glycoprotein hormones* (GPHs), vitellogenin (Vtg), ovarian development protein (ODP), *progesterone receptor* (ProR), dan farnesoic acid O-methyltransferase (FAMet), yang dapat berfungsi sebagai penanda molekuler tahap ovarium. Selain itu, ekspresi diferensial isoform crustacyanin (CrusA1 pada udang liar vs CrusC1 pada udang budidaya) menyoroti potensi respons adaptif yang terkait dengan lingkungan dan nutrisi (Montes-Dominguez *et al.*, 2021).
3. Proteomik melengkapi data transkriptomik dengan mengukur protein yang benar-benar diekspresikan dan berfungsi dalam sel. Studi proteomik pada *P. Monodon* mengungkapkan protein spesifik udang liar seperti p97/VCP-binding protein p135, protein domain lipoksigenase, dan euchromatic histone-lysine N-methyltransferase, serta ekspresi lebih tinggi dari serine/arginine-rich protein kinase

- 3 (PmSrpk3), yang menunjukkan potensinya sebagai biomarker kesiapan reproduksi (Sittikankaew, Uawisetwathana and Pootakham, 2026).
4. Metabolomik memberikan gambaran tentang produk akhir aktivitas metabolik sel. Integrasi metabolomik dan transkriptomik telah mengungkap jalur metabolik yang diperkaya selama pematangan ovarium, termasuk biosintesis asam lemak, steroidogenesis, dan metabolisme prostaglandin. Pada *L. Vannamei*, prostaglandin E2 dan F2 α (PGE2, PGF2 α) menurun pada ovarium matang, konsisten dengan perannya dalam mendukung perkembangan oosit pada tahap pematangan awal-menengah, sedangkan vitamin D3 dan E meningkat selama pematangan, menunjukkan kebutuhan metabolik spesifik tahap (Sittikankaew, Uawisetwathana and Pootakham, 2026).

5.4.2 Jaringan Regulasi Hormonal dan Genetik

Pendekatan multi-omics telah mengidentifikasi jalur-jalur hormonal dan genetik yang mengatur reproduksi udang secara terintegrasi. Sistem endokrin udang melibatkan kompleks X-organ-sinus gland di tangkai mata, otak, dan ganglia toraks yang memproduksi neuropeptida seperti *crustacean hyperglycemic hormone* (CHH), *gonad-inhibiting hormone* (GIH), *molt-inhibiting hormone* (MIH), dan *mandibular inhibiting hormone* (MOIH) (Chowdhury *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2026)

Pada jantan, kelenjar androgenic mensekresikan insulin-like androgenic gland hormone (IAG) yang merupakan regulator sentral diferensiasi seksual jantan dan spermatogenesis. Analisis transkriptomik *L. vannamei* setelah knock-down IAG menunjukkan pengurangan ekspresi gen terkait sitoskeleton (aktin1, miosin, heat shock protein 70), yang berkorelasi dengan gangguan spermatogenesis dan kualitas sperma. Studi lebih lanjut telah memetakan gen terkait spermatogenesis berdasarkan tahap perkembangan: regulator tahap awal (seperti *sex-determining region Y* (Sry), *sex lethal* (Sxl), *androgenic gland hormone-like protein* (AGH), protein fem-1 homolog (FEM-1)) dan penanda tahap menengah-akhir (*spermatogenesis-associated*

protein 20 (SPATA20), protamine P1-like (PRM1), dan doublesex (dsx)(Ai *et al.*, 2026; Chen *et al.*, 2026).

Untuk kedua jenis kelamin, investigasi multi-omics telah mengidentifikasi gen dan reseptor spesifik jaringan yang penting untuk vitellogenesis dan regulasi gonad, termasuk G protein-coupled receptors (GPCRs), GnRH receptor (GnRHR), epidermal growth factor receptor (EGFR), dan insulin-like growth factor I receptor (IGF1R) (Sittikankaew *et al.*, 2026). Komponen pensinyalan sentral seperti RAC serine/threonine-protein kinase (Akt/PKB), phosphatidylinositol-3-kinase subunit 1 (PI3K), insulin-like peptides (ILPs), dan mitogen-activated protein kinase 1 (MEK1) juga telah diidentifikasi sebagai regulator kunci. Temuan ini menunjukkan jalur-jalur konservatif—sinyal GnRH, pematangan oosit yang dimediasi progesteron, dan meiosis oosit—sebagai checkpoint molekuler dalam perkembangan gonad (Sittikankaew, Uawisetwathana and Pootakham, 2026).

5.4.3 Aplikasi Praktis untuk Produksi Berkelanjutan

Wawasan dari pendekatan multi-omics memungkinkan pengelolaan budidaya udang yang lebih terarah dan berkelanjutan:

1. **Optimasi Formulasi Pakan:** Pemahaman tentang kebutuhan metabolik spesifik tahap pematangan gonad memungkinkan perancangan pakan yang mendukung perkembangan ovarium secara optimal. Misalnya, peningkatan kebutuhan vitamin D3 dan E pada tahap akhir pematangan dapat diakomodasi dalam formulasi pakan induk
2. **Seleksi Induk Berbasis Marka Molekuler:** Penanda genetik dan protein yang diidentifikasi melalui studi omics dapat digunakan untuk menyeleksi induk dengan potensi reproduksi tinggi tanpa perlu menunggu hingga dewasa atau melakukan prosedur invasif
3. **Eliminasi Metode Invasif:** Pemahaman mendalam tentang jalur hormonal memungkinkan pengembangan metode non-invasif untuk menginduksi pematangan gonad, menggantikan ablasi mata yang selama ini menjadi praktik standar namun menimbulkan kesejahteraan hewan yang buruk

4. Manajemen Lingkungan: Pemahaman tentang respons molekuler terhadap faktor lingkungan seperti suhu, salinitas, dan kepadatan memungkinkan optimalisasi sistem budidaya untuk mendukung reproduksi yang sukses.

5.4.4 Tantangan dan Perspektif Masa Depan

Meskipun menjanjikan, penerapan pendekatan multi-omics dalam budidaya udang masih menghadapi beberapa tantangan. Keterbatasan basis data molekuler komprehensif yang mencakup informasi nukleotida, protein, dan metabolit masih menjadi hambatan kritis. Kurangnya genom referensi berkualitas tinggi dan basis data standar, serta keterbatasan cakupan analitik studi omics tunggal, menyebabkan pemahaman tentang jaringan regulasi kompleks yang mengoordinasikan pematangan reproduksi masih terfragmentasi.

Ke depan, perluasan dan pembagian terbuka sumber daya genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik akan sangat penting untuk memaksimalkan kekuatan omics terintegrasi dan mempercepat inovasi dalam budidaya udang. Fokus penelitian masa depan diarahkan pada pemanfaatan wawasan dari pendekatan multi-omics untuk mempromosikan pematangan udang melalui praktik berkelanjutan, sehingga menghilangkan metode invasif seperti ablasi mata.

5.5 Kesimpulan

Pendekatan molekuler telah merevolusi bioteknologi reproduksi udang dengan membuka pemahaman baru tentang mekanisme genetik dan fisiologis yang mengatur penentuan kelamin, pematangan gonad, dan keberhasilan reproduksi. Teknik molekuler seperti qPCR dan pengembangan marker genetik telah terbukti sangat berharga dalam mengidentifikasi gen-gen penentu kelamin, menyeleksi induk berdasarkan kualitas reproduksi, serta memantau dinamika ekspresi gen selama siklus reproduksi. Identifikasi gen IAG sebagai saklar utama determinasi kelamin jantan, serta gen *Dmrt* dan *Foxl2* sebagai regulator konservatif diferensiasi gonad, telah

memberikan dasar molekuler yang kuat untuk pengembangan teknologi produksi benih monoseks yang lebih efisien.

Pengembangan penanda genetik untuk diferensiasi kelamin dini dan kualitas reproduksi menawarkan jalan untuk seleksi induk yang lebih akurat dan percepatan program pemuliaan. Penanda berbasis PCR seperti MrMKn untuk udang galah dan fragmen RAP-PCR spesifik kelamin pada udang windu menunjukkan potensi besar untuk identifikasi kelamin awal, meskipun variasi genetik antar populasi masih menjadi tantangan yang perlu diatasi. Sementara itu, biomarker untuk pematangan gonad seperti gen vitellogenin (Vtg) dan reseptornya (Vtgr), serta gen-gen terkait reproduksi yang diidentifikasi melalui transkriptomik, memberikan alat untuk menilai kesiapan reproduksi induk secara non-invasif.

Integrasi data multi-omics (genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik) menjanjikan pemahaman yang lebih holistik tentang jaringan regulasi kompleks yang mengoordinasikan pematangan gonad udang. Pendekatan ini tidak hanya mengidentifikasi penanda molekuler potensial untuk seleksi induk, tetapi juga memberikan wawasan untuk mengoptimalkan formulasi pakan dan sistem budidaya guna meningkatkan keberhasilan reproduksi tanpa metode invasif seperti ablasi mata. Temuan lintas omics memperkuat pemahaman bahwa keberhasilan reproduksi merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor genetik, nutrisi, dan lingkungan, yang semuanya dapat dimonitor dan dioptimalkan melalui pendekatan molekuler.

Dengan demikian, penerapan pendekatan molekuler dalam bioteknologi reproduksi udang membuka jalan menuju strategi produksi benih yang lebih berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada induk liar dan metode invasif, serta meningkatkan ketahanan pangan akuakultur global. Tantangan ke depan termasuk perluasan basis data molekuler komprehensif, pengembangan genom referensi berkualitas tinggi, dan penerapan wawasan omics untuk praktik budidaya yang lebih ramah lingkungan dan efisien

DAFTAR PUSTAKA

- Ai, S. *et al.* (2026) 'Cold Stress and Molecular Regulation of Gonadal Development in Crustaceans: Phenotypic Responses, Molecular Regulation, and Aquaculture Implications', *Fishes*. MDPI, 11(6), p. 367.
- Bortolini, J. L. and Bauer, R. T. (2016) 'Persistence of reduced androgenic glands after protandric sex change suggests a basis for simultaneous hermaphroditism in a caridean shrimp', *The Biological Bulletin*. Marine Biological Laboratory Woods Hole, Massachusetts, 230(2), pp. 110–119.
- Chen, W.-Y. *et al.* (2026) 'Sex-Specific Responses to ER-stress in Eyestalk of *Litopenaeus vannamei*', *Developmental & Comparative Immunology*. Elsevier, p. 105638.
- Chowdhury, A. *et al.* (2024) 'Coral Reef Surveillance with Machine Learning: A Review of Datasets, Techniques, and Challenges', *Electronics*. MDPI, 13(24), p. 5027.
- Glaviano, F. *et al.* (2024) 'Molecular approaches detect early signals of programmed cell death in hippolyte inermis leach', *Current Issues in Molecular Biology*. MDPI, 46(6), pp. 6169–6185.
- Indarjo, A. *et al.* (2021) *Bioekologi dan Bioteknologi Udang Galah (Macrobrachium rosenbergii) Estuaria*. Syiah Kuala University Press.
- IZUMIYA, H. *et al.* (1997) 'Random amplified polymorphic DNA-PCR (RAPD-PCR).', *日本細菌学雑誌*, 52(4), pp. 776–785.
- Klinbunga, S. *et al.* (2015) 'Expression levels of vitellogenin receptor (Vtgr) during ovarian development and association between its single nucleotide polymorphisms (SNPs) and reproduction-related parameters of the giant tiger shrimp *Penaeus monodon*', *Aquaculture*, 435, pp. 18–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.09.013>.
- Leelatanawit, R. *et al.* (2011) 'A cDNA microarray, UniShrimpChip, for identification of genes relevant to testicular development in the black tiger shrimp (*Penaeus*

- monodon)', *BMC Molecular Biology*. Springer, 12(1), p. 15.
- Levy, T. and Sagi, A. (2020) 'The "IAG-switch"—A key controlling element in decapod crustacean sex differentiation', *Frontiers in Endocrinology*. Frontiers Media SA, 11, p. 651.
- Liu, F. *et al.* (2021) 'Insulin-like androgenic gland hormone 1 (IAG1) regulates sexual differentiation in a hermaphrodite shrimp through feedback to neuroendocrine factors', *General and Comparative Endocrinology*. Elsevier, 303, p. 113706.
- Marhual, N. P., Das, B. K. and Samal, S. K. (2012) 'Characterization of *Vibrio alginolyticus* and *Vibrio parahaemolyticus* isolated from *Penaeus monodon*: Antimicrobial resistance, plasmid profiles and random amplification of polymorphic DNA analysis', *Afr J Microbiol Res*, 6(20), pp. 4270–4276.
- Megawati, N., Alimuddin and Aliah, R. S. (2021) 'Identification of sex linked molecular markers in Indonesian giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*.'
- Montes-Dominguez, A. L. *et al.* (2021) 'Comparison between cultured and wild Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) vitellogenesis: Next-generation sequencing and relative expression of genes directly and indirectly related to reproduction', *PeerJ*. PeerJ Inc., 9, p. e10694.
- Nagahama, Y. *et al.* (2021) 'Sex determination, gonadal sex differentiation, and plasticity in vertebrate species', *Physiological reviews*. American Physiological Society Rockville, MD, 101(3), pp. 1237–1308.
- Nainggolan, R. K. S. *et al.* (2020) 'Deteksi *Vibrio parahaemolyticus* menggunakan marka gen *pirA* pada udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) dengan real time PCR', *Jurnal Riset Akuakultur*, 15(2), pp. 111–119.
- Nicol, B. *et al.* (2018) 'Genome-wide identification of FOXL2 binding and characterization of FOXL2 feminizing action in the fetal gonads', *Human molecular genetics*. Oxford University Press, 27(24), pp. 4273–4287.
- Rotllant, G. *et al.* (2015) 'Identification of genes involved in reproduction and lipid pathway metabolism in wild and domesticated shrimps', *Marine genomics*. Elsevier, 22, pp. 55–61.

- Ryan, L. (2019) 'An investigation of sexual reproduction and development in the giant tiger prawn, *Penaeus monodon*'. University of the Sunshine Coast.
- Sahlan, M. and Dewi, L. K. (2024) *Modifikasi Gen dan Aplikasi Pengembangan Diagnostik dengan Teknologi CRISPR*. Deepublish.
- Science, N., Agency, T. D. and Luang, K. (2006) 'Identification of Sex-specific Expression Markers in the Giant Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*)', 39(1), pp. 37–45.
- Silitonga, F. (2018) 'Analisis Keragaman Genetik Tiga Varietas Udang Galah, *Macrobrachium rosenbergii* (de Man, 1879) Menggunakan Penanda DNA Mitokondria'. FAKULTAS PERTANIAN.
- Sittikankaew, K. *et al.* (2026) 'Towards overcoming shrimp maturation challenges in aquaculture production using multi-omics approaches: A review in captive penaeid shrimp', *Aquaculture Reports*, 46, p. 103301. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.103301>.
- Sittikankaew, K., Uawisetwathana, U. and Pootakham, W. (2026) 'Towards overcoming shrimp maturation challenges in aquaculture production using multi-omics approaches : A review in captive penaeid shrimp', *Aquaculture Reports*. Elsevier B.V., 46(October 2025), p. 103301. doi: 10.1016/j.aqrep.2025.103301.
- Tang, M. *et al.* (2021) 'The regulatory relationships between the gonad-inhibiting hormone and insulin-like androgenic gland hormone-binding protein genes in the eyestalk-androgenic gland-testis axis of *Macrobrachium rosenbergii*', *Frontiers in Marine Science*. Frontiers Media SA, 8, p. 775191.
- Wahl, M. *et al.* (2023) 'Monosex populations of the Giant freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*—from a pre-molecular start to the next generation era', *International Journal of Molecular Sciences*. MDPI, 24(24), p. 17433.
- Wang, T. *et al.* (2024) 'Molecular mechanisms of sex determination and differentiation in decapod crustaceans for potential aquaculture applications: An overview',

Reviews in Aquaculture. Wiley Online Library, 16(4), pp. 1819–1839.

- Xu, H.-J. *et al.* (2022) 'Full functional sex reversal achieved through silencing of MroDmrt11E gene in *Macrobrachium rosenbergii*: production of all-male monosex freshwater prawn', *Frontiers in Endocrinology*. Frontiers Media SA, 12, p. 772498.
- Xu, P. and Jin, L. (2025) 'Genomic evolution of growth and reproduction related genes in shrimp', *International Journal of Marine Science*, 15.
- Zhang, D., Sun, M. and Liu, X. (2017) 'Phase-specific expression of an insulin-like androgenic gland factor in a marine shrimp *Lysmata wurdemanni*: Implication for maintaining protandric simultaneous hermaphroditism', *PLoS One*. Public Library of Science San Francisco, CA USA, 12(2), p. e0172782.
- Zhou, T. *et al.* (2021) 'Insulin-like androgenic gland hormone from the shrimp *Fenneropenaeus merguensis*: Expression, gene organization and transcript variants', *Gene*. Elsevier, 782, p. 145529.
- Zhu, Y. *et al.* (2023) 'Molecular cloning and expression patterns of a sex-biased transcriptional factor *Foxl2* in the giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*)', *Molecular Biology Reports*. Springer, 50(4), pp. 3581–3591.

BAB 6

PERAN LINGKUNGAN DALAM REGULASI REPRODUKSI UDANG

Akuakultur sebagai sektor penting dalam penyediaan sumber protein hewani sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian ketahanan pangan dunia. Udang di Indonesia termasuk komoditas utama karena memiliki laju pertumbuhan yang relatif cepat, daya adaptasi yang tinggi terhadap variasi lingkungan, serta memberikan nilai ekonomis yang signifikan di pasar nasional maupun global (Ye, et al., 2023).

Keberhasilan budidaya udang vaname sangat ditentukan oleh kondisi lingkungan perairan, khususnya parameter kualitas air. Variabel seperti suhu, salinitas, pH, alkalinitas, oksigen terlarut (*dissolved oxygen*: DO), serta konsentrasi senyawa nitrogen (NH_4 , NH_3^+ , NO_2^- , dan NO_3^-) memiliki peran signifikan dalam menunjang pertumbuhan, kelangsungan hidup, dan produktivitas udang (Sinha & Banerjee, 2025). Selain itu, faktor lain seperti keberadaan bakteri patogen, total bahan organik (*total organic matter*, TOM), tingkat kecerahan, hingga warna perairan juga berkontribusi terhadap stabilitas ekosistem tambak (Li, et al., 2021). Kualitas air yang tidak sesuai dengan kisaran optimal berpotensi menimbulkan stres, menurunkan laju pertumbuhan, hingga meningkatkan risiko serangan penyakit.

Keberhasilan reproduksi udang, terutama dalam skala budidaya intensif, sangat bergantung pada manipulasi dan stabilitas faktor lingkungan. Faktor eksternal seperti kualitas air bertindak sebagai pemicu (*trigger*) bagi sistem neuroendokrin udang untuk memulai proses pematangan gonad. Ketidakstabilan lingkungan tidak hanya menghambat kematangan seksual tetapi juga dapat menyebabkan stres fisiologis yang menurunkan daya tetas telur dan kualitas larva.

6.1 Pengaruh Faktor Fisika Air terhadap Kecepatan Maturasi Gonad

6.1.1 Stimulasi Fluktuasi Suhu Kontrol dalam Memicu *Spawning*

Suhu merupakan faktor pembatas utama yang mempengaruhi laju metabolisme, pertumbuhan, dan siklus reproduksi krustasea. Hal ini disebabkan karena hewan ini bersifat ektotermik dan poikilotermik, yaitu suhu tubuhnya mengikuti suhu lingkungan. Perubahan suhu air akan langsung memengaruhi laju metabolisme, penggunaan energi, aktivitas enzim, serta kerja sistem saraf dan hormon yang mengendalikan reproduksi. Udang tidak mampu mempertahankan suhu tubuh yang tetap secara mandiri, sehingga setiap perubahan suhu air akan memicu perubahan proses biokimia di dalam sel-selnya. Oleh karena itu, hubungan antara suhu air dan aktivitas hormon reproduksi menjadi dasar penting dalam pengelolaan lingkungan pada fasilitas pembenihan untuk mengoptimalkan keberhasilan reproduksi udang (Kumlu, Türkmen, & Kumlu, 2010).

Pada tingkat sel, suhu air memengaruhi kondisi membran sel dan aktivitas berbagai enzim yang berperan dalam mengatur keseimbangan garam dan air di dalam tubuh udang. Ketika suhu air berada pada kisaran yang optimal dan stabil, pergerakan molekul menjadi lebih aktif sehingga neurotransmitter seperti serotonin dapat lebih mudah berikatan dengan reseptornya pada sel-sel saraf di ganglion otak. Proses ini kemudian memicu serangkaian aktivitas di dalam sel yang meningkatkan produksi dan pelepasan hormon perangsang reproduksi (*gonad-stimulating hormone*/GSH) ke dalam hemolimfa, yaitu cairan sirkulasi yang berfungsi seperti darah pada krustasea. Akibatnya, proses perkembangan dan pematangan gonad dapat berlangsung lebih efektif.

Suhu air tidak hanya memengaruhi aktivitas metabolisme udang, tetapi juga memengaruhi kerja enzim yang berperan dalam pembentukan hormon reproduksi dan hormon pergantian kulit. Suhu optimal untuk pemeliharaan induk berkisar antara 28–32°C. Peningkatan suhu dalam rentang yang sesuai dapat

mempercepat perkembangan embrio dan pematangan gonad dengan mengatur sintesis hormon. Peningkatan suhu air secara terkontrol dalam kisaran optimal dapat mempercepat proses perubahan kolesterol yang berasal dari pakan menjadi hormon aktif yang berperan penting dalam proses fisiologis udang.

Pengaruh suhu tidak selalu bersifat positif. Suhu air yang melebihi batas optimal, terutama di atas 32°C menyebabkan protein reseptor yang berfungsi menangkap vitellogenin (bahan pembentuk kuning telur) dapat mengalami kerusakan akibat panas. Akibatnya, oosit atau sel telur tidak mampu menyerap vitellogenin secara efektif sehingga proses pematangan gonad terhambat. Kondisi ini juga meningkatkan risiko terjadinya atresia oosit, yaitu kerusakan atau kegagalan perkembangan sel telur akibat stres panas. Oleh karena itu, pemahaman mengenai pengaruh suhu terhadap proses fisiologis dan reproduksi udang sangat penting sebelum melakukan manipulasi suhu pada bak pemeliharaan induk (Ruiz, Carrillo, Uriarte, & Plascencia, 2023).

Thermal shock induction atau kejut suhu terkontrol merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk merangsang pemijahan udang. Teknik ini dilakukan dengan menciptakan perubahan suhu harian yang menyerupai kondisi alami di habitatnya. Perubahan suhu yang terjadi akibat pasang surut atau pergantian musim menjadi sinyal bahwa kondisi lingkungan mendukung kelangsungan hidup larva, termasuk tersedianya pakan alami yang cukup. Sinyal tersebut merangsang udang untuk mematangkan gonad dan melakukan pemijahan secara serentak. Oleh karena itu, teknik kejut suhu dimanfaatkan di hatchery untuk menyinkronkan pelepasan gamet dan meningkatkan keberhasilan reproduksi.

Di fasilitas pembenihan modern, teknik kejut suhu digunakan untuk merangsang pemijahan udang dengan mengatur perubahan suhu air secara terkontrol menggunakan pemanas (*heater*) atau pendingin (*chiller*) yang terhubung dengan sistem otomatis. Proses ini dimulai dengan memindahkan induk betina yang telah matang gonad dari bak pemeliharaan bersuhu 28°C ke bak pemijahan yang bersuhu lebih rendah, sekitar 25°C, selama 2-3 jam (Foote, Mair, & Sellars, 2012).

Penurunan suhu tersebut menyebabkan perubahan fisiologis yang menekan pelepasan hormon penghambat pematangan gonad (GIH) dari tangkai mata. Setelah fase pendinginan selesai, suhu air dinaikkan secara bertahap hingga mencapai 31°C dengan laju sekitar 1°C setiap 30 menit. Kenaikan suhu ini berfungsi sebagai rangsangan yang mengaktifkan sistem saraf dan hormon yang berperan dalam proses pemijahan (Foote, Mair, & Sellars, 2012).

Peningkatan suhu memicu pelepasan senyawa prostaglandin dari jaringan ovarium. Senyawa ini merangsang kontraksi otot di sekitar ovarium sehingga telur yang telah matang terdorong keluar melalui saluran reproduksi dan dilepaskan ke dalam air. Mekanisme ini memungkinkan terjadinya pemijahan secara serempak dengan tingkat sinkronisasi yang tinggi, terutama pada malam hari (Kumlu, Türkmen, & Kumlu, 2010).

Keberhasilan teknik ini sangat dipengaruhi oleh kemampuan udang beradaptasi terhadap perubahan suhu. Kemampuan tersebut ditentukan oleh batas toleransi suhu atau thermal tolerance window, yaitu kisaran suhu yang masih dapat ditoleransi tanpa menimbulkan gangguan fisiologis. Batas ini biasanya diukur melalui nilai Critical Thermal Maximum (CTMax) dan Critical Thermal Minimum (CTMin), yaitu suhu tertinggi dan terendah yang masih dapat ditoleransi sebelum udang kehilangan kemampuan bergerak dan menjaga keseimbangan tubuh (Kumlu, Türkmen, & Kumlu, 2010).

Pada induk udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) unggul yang bersertifikat SPF, kisaran suhu optimal untuk mendukung reproduksi berada antara 27,5–30,5°C. Pada kisaran ini, energi metabolisme dapat dimanfaatkan secara efisien untuk mendukung pembentukan dan pematangan telur. Suhu air 32–33°C dapat memicu stres lingkungan. Kondisi ini yang secara signifikan memperpendek masa inkubasi *Infectious Myonecrosis Virus* (IMNV) dan meningkatkan risiko kematian pada udang *Litopenaeus vannamei* (Za, et al., 2026). Sebaliknya, jika suhu turun di bawah 26°C, nafsu makan dan aktivitas enzim pencernaan akan menurun sehingga pasokan nutrisi untuk perkembangan gonad berkurang. Kondisi tersebut dapat

memperlambat proses reproduksi dan memperpanjang siklus pergantian kulit hingga dua kali lebih lama dibandingkan kondisi normal (Foote, Mair, & Sellars, 2012).

Penerapan pengelolaan suhu harian yang terkontrol, yaitu dengan menurunkan suhu air secara bertahap pada malam hari (misalnya dari 29°C pada siang hari menjadi 26,5°C pada malam hari), dapat meniru kondisi alami yang terjadi di lingkungan perairan laut. Penurunan suhu ini menyebabkan aktivitas metabolisme udang menurun dari kondisi aktif menjadi kondisi istirahat. Akibatnya, kebutuhan energi untuk proses dasar tubuh seperti respirasi menjadi lebih rendah, sehingga penggunaan cadangan energi tubuh dapat ditekan. Energi yang sebelumnya digunakan untuk mempertahankan aktivitas metabolisme kemudian dapat dialihkan untuk mendukung perkembangan dan pematangan ovarium (Kumlu, Türkmen, & Kumlu, 2010).

Pada sistem suhu konstan yang tinggi, kelelahan metabolik (*metabolic exhaustion*) terjadi lebih cepat, yang secara histologis dicirikan oleh tingginya prevalensi kerusakan sel-R pada tubulus hepatopankreas. Kondisi ini memicu pemulihan pasca-pemijahan yang lambat dan memperpanjang jarak antar-pemijahan karena induk kehabisan modalitas energi untuk menginisiasi kembali transkripsi gen vitellogenin. Dengan demikian, penerapan teknik fluktuasi termal diurnal terkontrol merepresentasi strategi rekayasa lingkungan non-invasif yang jauh lebih efisien dan berkelanjutan untuk mengoptimalkan kapasitas reproduksi stok induk tanpa memicu deplesi energi somatik (Kumlu, Türkmen, & Kumlu, 2010)

6.1.2 Peran Tekanan Osmotik Salinitas Terhadap Kualitas Sperma dan Daya Tetas Telur

Kemampuan osmoregulasi dan alokasi energi untuk menjaga keseimbangan osmotik merupakan aspek fisiologis penting yang berperan dalam mendukung keberhasilan reproduksi udang penaeid. Udang termasuk organisme eurihalin dengan kemampuan osmoregulasi yang tinggi, sehingga mampu menjaga kestabilan osmolaritas cairan tubuh (hemolimfa) pada berbagai kondisi salinitas. Pada lingkungan dengan salinitas rendah, hemolimfa cenderung bersifat hiperosmotik

dibandingkan media sekitarnya, sedangkan pada salinitas tinggi hemolimfa menjadi hipoosmotik terhadap media eksternal. Kondisi ketika tekanan osmotik hemolimfa setara dengan tekanan osmotik lingkungan dikenal sebagai titik isosmotik (*isosmotic point*), yang nilainya dapat berbeda-beda antarspesies (Lignot, Pierrot, & Charmantier, 2000).

Pengaruh perubahan kadar salinitas air terhadap tekanan osmotik hemolimfa dan jaringan ovarium merupakan aspek penting yang menggambarkan interaksi fisikokimia dalam mengatur pergerakan air di tingkat sel selama proses perkembangan oosit. Jaringan ovarium udang memiliki kemampuan permeabilitas air yang bersifat dinamis, dimana sel-sel folikel berperan sebagai membran semipermeabel yang mengendalikan tingkat hidrasi oosit. Perubahan salinitas media pemeliharaan akan diikuti oleh perubahan osmolaritas hemolimfa, sehingga memengaruhi pergerakan air dan jumlah cairan di dalam ovarium. Mekanisme tersebut berperan penting dalam mendukung pertumbuhan, pematangan, dan perkembangan sel telur pada udang (Lignot, Pierrot, & Charmantier, 2000).

Ketika salinitas media turun secara drastis hingga berada di bawah kisaran toleransi udang, tekanan osmotik hemolimfa menjadi lebih rendah dibandingkan tekanan osmotik di dalam oosit. Kondisi ini menyebabkan air masuk ke dalam oosit melalui proses osmosis. Masuknya air dalam jumlah berlebih mengakibatkan oosit mengalami pembengkakan (*oocyte swelling*), sehingga mengganggu struktur sel dan proses perkembangan telur pada udang (Yuwono, Sukardi, & Purnama, 2008).

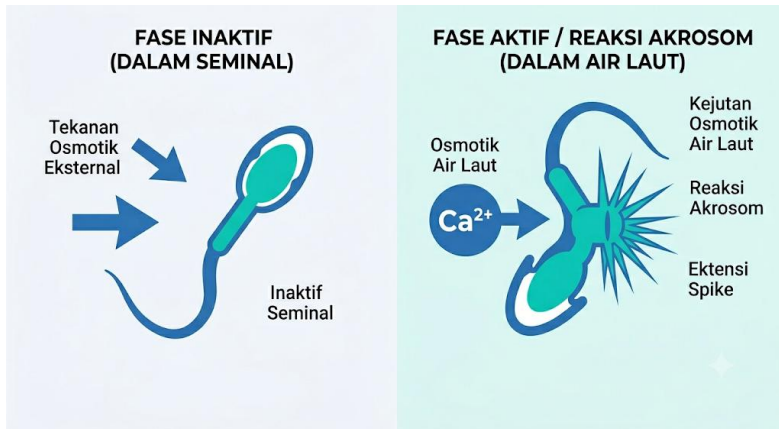
Sebaliknya, pada salinitas yang sangat tinggi (>40 ppt), tekanan osmotik hemolimfa menjadi lebih tinggi dibandingkan tekanan osmotik di dalam oosit. Akibatnya, air keluar dari oosit menuju hemolimfa sehingga sel mengalami penyusutan atau dehidrasi (*oocyte shrinkage*). Kondisi ini menyebabkan sitoplasma menjadi lebih kental, menghambat aktivitas organel sel, serta mengganggu penyerapan vitellogenin yang penting dalam proses pematangan telur. Secara fisik, ovarium yang mengalami dehidrasi akan tampak mengecil, lebih kaku, dan

mengalami hambatan perkembangan meskipun telah diberikan perlakuan hormonal (Yuwono, Sukardi, & Purnama, 2008).

Aktivasi spermatozoa akibat perubahan tekanan osmotik pada media pembuahan merupakan salah satu tahapan penting yang menentukan keberhasilan fertilisasi pada udang. Berbeda dengan spermatozoa pada banyak hewan lainnya, spermatozoa udang tidak memiliki flagela sehingga tidak dapat bergerak secara aktif. Spermatozoa disimpan dalam spermatofor pada tubuh jantan kondisi tidak aktif yang dipertahankan oleh tekanan osmotik dan konsentrasi ion tertentu pada cairan seminal (Chen, et al., 2019).

Aktivasi spermatozoa terjadi ketika spermatofor dikeluarkan dan bersentuhan dengan air laut yang memiliki tekanan osmotik berbeda dengan lingkungan di dalam tubuh jantan. Perubahan tekanan osmotik tersebut memicu masuknya ion kalsium (Ca^{2+}) ke dalam sel spermatozoa. Ion kalsium kemudian berperan sebagai sinyal yang mengaktifkan berbagai proses seluler yang diperlukan untuk pembuahan (Chen, et al., 2019).

Proses aktivasi ini menyebabkan terjadinya reaksi akrosom, yaitu perubahan bentuk spermatozoa yang menghasilkan struktur menyerupai tonjolan atau spike pada bagian ujungnya. Struktur tersebut membantu spermatozoa menembus lapisan pelindung telur dan memungkinkan terjadinya fertilisasi. Dengan demikian, perubahan tekanan osmotik tidak hanya mengaktifkan spermatozoa, tetapi juga memfasilitasi proses penetrasi sel telur yang penting bagi keberhasilan reproduksi udang (Chen, et al., 2019).



Gambar 6.1. Reaksi Akrosom

Optimalisasi salinitas untuk meningkatkan tingkat keberhasilan penetasan telur di hatchery memerlukan penentuan kisaran salinitas yang sesuai dengan kebutuhan fisiologis setiap tahap perkembangan embrio. Selama proses perkembangan embrio, mulai dari tahap pembelahan sel (*cleavage*), blastula, gastrula, neurula, hingga terbentuk nauplius di dalam telur, diperlukan kondisi salinitas yang stabil. Kondisi tersebut penting untuk menjaga keseimbangan osmotik sehingga energi embrio tidak banyak digunakan untuk proses osmoregulasi dan dapat lebih difokuskan untuk mendukung pertumbuhan serta perkembangan embrio (Mendoza-Cano et al., 2025).

6.2 Peranan Faktor Kimia Air terhadap Stabilitas Reproduksi

Faktor kimia air merupakan salah satu komponen lingkungan yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan fisiologis dan keberlangsungan fungsi reproduksi udang. Parameter seperti salinitas, pH, oksigen terlarut, amonia, nitrit, dan alkalinitas dapat memengaruhi berbagai proses reproduktif, mulai dari pematangan gonad, produksi gamet, fertilisasi, hingga perkembangan embrio. Kondisi kimia perairan yang berada pada kisaran optimal memungkinkan berlangsungnya proses metabolisme dan regulasi osmotik secara efisien, sehingga mendukung stabilitas reproduksi. Sebaliknya, penyimpangan

kualitas kimia air dapat memicu stres fisiologis yang berdampak pada penurunan performa reproduksi dan keberhasilan produksi benih.

6.2.1 Pengaruh Derajat Keasaman (pH) terhadap Laju Metabolisme Induk

Keseimbangan derajat keasaman (pH) hemolimfa dan fungsi sistem *buffer* bikarbonat berperan penting dalam menjaga kondisi fisiologis induk udang tetap stabil. Sebagai hewan dengan sistem peredaran darah terbuka (Arthropoda), hemolimfa udang mengalir dan bersentuhan langsung dengan organ-organ tubuh sehingga mudah dipengaruhi oleh perubahan kondisi kimia perairan. Akibatnya, pH hemolimfa dapat berubah seiring dengan fluktuasi konsentrasi ion hidrogen (H^+) dan karbon dioksida (CO_2) yang terlarut dalam media pemeliharaan. Oleh karena itu, sistem *buffer* bikarbonat diperlukan untuk mempertahankan keseimbangan asam-basa tubuh, sehingga berbagai proses fisiologis dapat berlangsung secara normal (Li, et al., 2022).

Kisaran pH yang ideal untuk pemeliharaan induk udang adalah 7,5–8,5. Penurunan pH air akibat akumulasi asam organik dari sisa pakan dan bahan organik lainnya dapat mengganggu keseimbangan asam-basa pada tubuh udang. Kondisi ini meningkatkan masuknya ion hidrogen (H^+) ke dalam hemolimfa sehingga memicu asidosis. Untuk mempertahankan kestabilan pH internal, sistem buffer bikarbonat akan mengikat ion H^+ dan mengubahnya menjadi CO_2 yang kemudian dikeluarkan melalui insang. Namun, apabila kondisi asam berlangsung terus-menerus atau terlalu ekstrem, kapasitas sistem buffer dapat menurun karena cadangan bikarbonat dalam hemolimfa semakin berkurang (Allen, Quijada-Rodriguez, Wilson, & Weihrauch, 2024).

Berkurangnya kapasitas buffer bikarbonat menyebabkan penurunan pH pada tingkat sel, termasuk pada organ-organ yang berperan dalam reproduksi. Kondisi ini dapat mengganggu aktivitas enzim, proses metabolisme nutrisi, serta mekanisme hormonal yang mendukung sintesis vitellogenin sebagai prekursor pembentukan kuning telur. Oleh karena itu, pengelolaan pH air yang stabil, terutama pada bak maturasi,

menjadi faktor penting untuk menjaga keseimbangan fisiologis dan performa reproduksi induk udang (Carvalho, et al., 2025).

Dampak lain dari kondisi asidosis adalah terganggunya proses pengerasan karapas setelah molting. Pada fase ini, udang membutuhkan penyerapan kalsium (Ca^{2+}) dan karbonat (CO_3^{2-}) dalam jumlah besar untuk membentuk eksoskeleton yang kuat (Allen, Quijada-Rodriguez, Wilson, & Weihrauch, 2024). Ketika pH air terlalu rendah, keseimbangan kimia karbonat dalam perairan berubah sehingga ketersediaan ion karbonat untuk proses mineralisasi karapas menjadi berkurang.

Selain itu, kondisi asidosis dapat mendorong tubuh udang menggunakan cadangan kalsium karbonat yang tersimpan pada karapas untuk membantu mempertahankan keseimbangan pH hemolimfa. Akibatnya, pembentukan karapas baru menjadi kurang optimal sehingga eksoskeleton cenderung lebih lunak dan rapuh (Carvalho, et al., 2025).

Karapas yang tidak mengeras secara sempurna dapat menurunkan kemampuan gerak dan aktivitas reproduksi udang. Pada udang jantan, kondisi ini dapat menghambat proses kopulasi karena berkurangnya kemampuan mencengkeram pasangan. Pada udang betina, pembentukan struktur reproduksi yang mendukung penyimpanan spermatofor juga dapat terganggu. Oleh karena itu, pengelolaan pH air yang optimal merupakan faktor penting untuk mendukung keberhasilan reproduksi dan kesehatan induk udang (Carvalho, et al., 2025).

6.2.2 Pengaruh Oksigen Terlarut (DO) terhadap Laju Metabolisme Induk

Oksigen terlarut (*Dissolved Oxygen/DO*) merupakan salah satu parameter kualitas air yang sangat penting dalam mendukung berbagai proses fisiologis udang. Oksigen berperan sebagai akseptor elektron akhir dalam respirasi aerobik yang menghasilkan energi dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP). Energi tersebut digunakan untuk mempertahankan fungsi dasar tubuh, aktivitas osmoregulasi, sintesis biomolekul, pertumbuhan, dan reproduksi. Oleh karena itu, ketersediaan oksigen terlarut yang memadai menjadi faktor utama yang menentukan laju metabolisme dan kondisi fisiologis induk udang selama masa

pemeliharaan. Peningkatan kebutuhan energi selama proses reproduksi menyebabkan induk udang memerlukan pasokan oksigen yang lebih tinggi dibandingkan pada kondisi fisiologis normal. Penurunan kadar DO dapat menyebabkan stres fisiologis, menurunkan efisiensi metabolisme, serta mengganggu berbagai fungsi biologis penting pada udang (Araujo, et al., 2025).

Kebutuhan oksigen meningkat seiring dengan perkembangan gonad, terutama pada fase vitelogenesis ketika terjadi sintesis vitellogenin dan akumulasi kuning telur di dalam oosit. Pada tahap ini, aktivitas metabolisme hepatopankreas dan ovarium berlangsung secara intensif sehingga membutuhkan energi dalam jumlah besar. Oksigen yang diserap melalui insang kemudian diangkut oleh hemosianin dalam hemolimfa menuju berbagai jaringan tubuh, termasuk organ reproduksi. Ketersediaan oksigen yang cukup memungkinkan proses metabolisme aerobik berlangsung secara optimal sehingga mendukung perkembangan gonad, pematangan oosit, dan pembentukan telur yang berkualitas. Sebaliknya, penurunan kadar oksigen terlarut dapat mengurangi efisiensi produksi energi, menghambat proses vitelogenesis, serta menurunkan kualitas gamet yang dihasilkan (Chang, et al., 2022).

Kondisi hipoksia atau kekurangan oksigen yang berlangsung dalam waktu lama dapat memicu stres fisiologis pada induk udang. Pada kondisi tersebut, tubuh akan mengurangi berbagai aktivitas metabolisme yang tidak bersifat vital untuk mempertahankan kelangsungan hidup. Akibatnya, proses reproduksi menjadi salah satu fungsi yang terdampak, ditandai dengan terhambatnya pematangan gonad, menurunnya kualitas telur, serta berkurangnya keberhasilan perkembangan embrio. Telur yang dihasilkan dari induk yang mengalami hipoksia umumnya memiliki cadangan energi yang lebih rendah sehingga perkembangan embrio dan kelangsungan hidup larva dapat terganggu.

Dalam kegiatan pembenihan, pengelolaan kadar oksigen terlarut menjadi aspek penting untuk menjamin keberhasilan reproduksi induk udang. Konsentrasi DO yang optimal membantu mempertahankan metabolisme aerobik, mendukung perkembangan gonad, serta meningkatkan kualitas telur dan

larva yang dihasilkan. Oleh karena itu, sistem aerasi yang memadai perlu diterapkan untuk menjaga kestabilan kadar oksigen dalam media pemeliharaan. Penggunaan teknologi aerasi modern, seperti micro-bubble generator atau nano-aerator, dapat meningkatkan efisiensi transfer oksigen ke dalam air sehingga kebutuhan metabolisme induk selama fase reproduksi dapat terpenuhi secara optimal (Patkaew, et al., 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, G. J., Quijada-Rodriguez, A. R., Wilson, J. M., & Weihrauch, D. (2024). The role of the antennal glands and gills in acid-base regulation and ammonia excretion of a marine osmoconforming brachyuran. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 292(111619). doi:10.1016/j.cbpa.2024.111619
- Araujo, A. N., Andres, C. F., Nguyen, K. Q., Corby, T. L., Rhodes, M. A., García, J., . . . Davis, D. A. (2025). Effects of minimum dissolved oxygen setpoints for aeration in semi-intensive pond production of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 594(741376). doi:10.1016/j.aquaculture.2024.741376
- Carvalho, F. G., Guertler, C., Vieira, F. B., Serafini, R. d., Massago, H., Silva, E. d., . . . Andreatta, E. R. (2025). Does the Biofloc System Affect Water Quality, Reproduction, and Hemato-Immunology of *Penaeus vannamei* During Broodstock Maturation? *Animals*, 15(23), 1-15. doi:10.3390/ani15233424
- Chang, F., Olga, V., Diao, X., Tang, X., Li, N., Wang, X., . . . Shi, X. (2022). Physiological and muscle tissue responses in *Litopenaeus vannamei* under hypoxic stress via iTRAQ. *Frontiers in Physiology*, 13(979472), 1-13. doi:10.3389/fphys.2022.979472
- Chen, T., Sun, Z., Mu, S., Jiang, L., Li, C., Li, L., . . . Kang, X. (2019). Ultrastructure of spermiogenesis and the distribution of spermatozoal nuclear histones in the Japanese mantis shrimp, *Oratosquilla oratoria* (Crustacea: Stomatopoda). *Journal Morphol*, 280(8), 1170–1184. doi:10.1002/jmor.21008
- Foote, A. R., Mair, G. C., & Sellars, A. T. (2012). Tetraploid inductions of *Penaeus monodon* using cold shock. *Aquaculture International*, 20, 1003-1007.
- Kumlu, M., Türkmen, S., & Kumlu, M. (2010). Thermal tolerance of *Litopenaeus vannamei* (Crustacea: Penaeidae) acclimated to four temperatures. *Journal of Thermal Biology*, 35(6), 305-308. doi:10.1016/j.jtherbio.2010.06.009
- Li, J., Fang, L., Liang, X-F., Guo, W., Lv, L., & Li, L. (2021). Influence of environmental factors and bacterial community diversity in pond water on health of Chinese perch through Gut Microbiota change. *Aquaculture Reports*, 20(100629), 1-9. doi:10.1016/j.aqrep.2021.100629

- Li, Y., Pan, L., Tong, R., Li, Y., Li, Z., & Chen, Y. (2022). Effects of ammonia-N stress on molecular mechanisms associated with immune behavior changes in the haemocytes of *Litopenaeus vannamei*. *Molecular Immunology*, 149, 1-12. doi:10.1016/j.molimm.2022.05.122
- Lignot, J. H., Pierrot, C. S., & Charmantier, G. (2000). Osmoregulatory capacity as a tool in monitoring the physiological condition and the effect of stress in crustaceans. *Aquaculture*, 191(1-3), 209-245. doi:10.1016/S0044-8486(00)00429-4
- Patkaew, S., Direkbusarakom, S., Hirono, I., Wuthisuthimethavee, S., Powtongsook, S., & Pooljun, C. (2024). Effect of supersaturated dissolved oxygen on growth-, survival-, and immune-related gene expression of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Veterinary World*, 17(1), 50-58. doi:10.14202/vetworld.2024.50-58
- Ruiz, R. G., Carrillo, L. L., Uriarte, A. B., & Plascencia, G. Y. (2023). The combination of hypoxia and high temperature affects heat shock, anaerobic metabolism, and pentose phosphate pathway key components responses in the white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Cell Stress and Chaperones*, 28(5), 493-509. doi:10.1007/s12192-022-01265-1
- Sinha, G., & Banerjee, D. M. (2025). Water Quality Management In Aquaculture: Trends And Techniques. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(14s), 1911-1927.
- Ye, Y., Zhu, B., Zhang, J., Yang, Y., Tian, J., Xu, W., . . . Zhao, Y. (2023). Comparison of Growth Performance and Biochemical Components between Low-Salinity-Tolerant Hybrid and Normal Variety of Pacific White Shrimp (*Penaeus vannamei*). *Animals*, 13(18), 2837.
- Yuwono, E., Sukardi, & Purnama. (2008). *Fisiologi Hewan Air Edisi Kedua*. Purwokerto: Unsoed Press.
- Za, I. F., Zaidy, A. B., Sugama, K., Hasan, S., Fitriadi, R., Ihtifazhuddin, M. I., . . . Kamaruddin. (2026). The Effect of Temperature on Survival Rate of White leg Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Infected with Infectious Myonecrosis Virus. *World's Veterinary Journal*, 16(1), 32-42. doi:10.54203/scil.2026.wvj3

BAB 7

NUTRISI DAN METABOLISME

REPRODUKSI UDANG

7.1 Peran Nutrient

Nutrisi berperan penting pada pematangan gonad, kualitas telur, dan ketahanan udang terhadap stres. Pada udang, proses *vitellogenesis*, sintesis hormon, dan penyediaan energi sangat bergantung pada protein, lemak, vitamin dan pengelolaan karbohidrat. Protein, asam amino (arginin), asam lemak tak jenuh ganda rantai panjang (LC-PUFA), kolesterol dan karotenoid berperan penting dalam mengoptimalkan perkembangan ovarium yang pengaturannya dimediasi melalui aktivitas jalur endokrin (mTOR dan *streoidogenesis*) (Dildar, Cui and Ma, 2025).

Udang yang memperoleh pakan dengan kadar protein 52,81% menunjukkan konsentrasi *vitellogenin* (VTG) serum yang lebih tinggi. Selain itu, pemberian pakan dengan kandungan protein tersebut juga dapat meningkatkan tingkat ekspresi *gen vitellogenin 1* (*vg1*), *vtg*, dan *reseptor vitellogenin* (*vgr*) pada ovarium. Konsentrasi VTG tertinggi pada hepatopankreas dan ovarium juga ditemukan pada udang yang diberi pakan berkadar protein 52,81% (Li *et al.*, 2023). Kajian pada krustasea menunjukkan bahwa komposisi pakan yang ideal untuk mendukung pertumbuhan dan performa reproduksi yang optimal umumnya diperoleh melalui pakan dengan kandungan protein 30%-35%, dan lemak 8%-12%, serta profil asam amino tertentu, seperti arginin 2,5%-4,5%, taurin 0,6%-1,0%, dan treonin 1,5%-1,7%. Selain faktor nutrisi, kondisi lingkungan, berupa suhu dan fotoperiode yang sesuai diketahui lebih efektif dalam mengatur perkembangan ovarium, meningkatkan keberhasilan pemijahan dan performa reproduksi (Dildar, Cui and Ma, 2025).

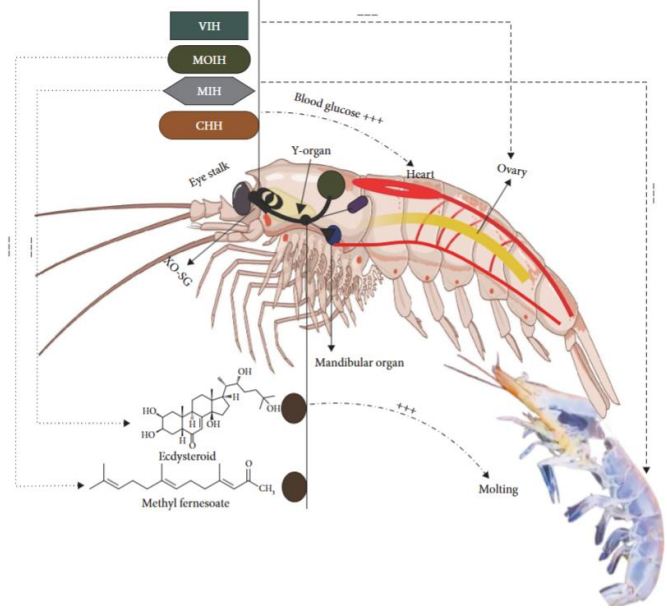
Kandungan arginin sebesar 4,08–4,53% dalam pakan diketahui mampu mempercepat perkembangan ovarium melalui peningkatan konsentrasi beberapa hormon serum, seperti *metilfarnesoat* (MF), *5-hidroksitriptamin* (5-HT), *estradiol* (E2), dan *hormon pelepas gonadotropin* (GnRH), serta *hormon steroid drosophila 1* (cyp18a). Selain itu, arginin juga berperan dalam meningkatkan sintesis *vitellogenin eksogen* pada *hepatopankreas* dan *vitellogenin endogen* pada ovarium (X. Zhang *et al.*, 2024). Kajian mengenai asam amino pada krustasea menunjukkan bahwa asam amino esensial dan non-esensial tidak hanya berfungsi sebagai penyusun protein, namun juga berperan sebagai prekursor dalam pembentukan glukosa, lemak, hormon, dan senyawa antioksidan (Li Xinyu and Han, 2021).

Penambahan fosfolipid sebesar 4% dalam pakan terbukti mampu mempercepat proses pematangan ovarium pada udang betina secara signifikan. Pemberian pakan berbasis minyak krill juga meningkatkan indeks gonadosomatik, deposisi kuning telur, akumulasi lemak, dan sekresi hormon estrogen. Analisis lipidomik menunjukkan adanya perubahan signifikan pada metabolisme gliserofosfolipid dan asam lemak yang ditandai dengan peningkatan kandungan trigliserida serta sterol pada ovarium (Liang *et al.*, 2022a).

Highly unsaturated fatty acids (HUFA) seperti EPA, DHA, dan ALA memiliki peranan penting dalam perkembangan gonad serta kualitas larva. Pada udang, suplementasi ALA, EPA, dan DHA dalam pakan untuk mendukung pertumbuhan optimal, masing-masing berkisar antara 2,5%–3,89%, 1,7%–3,19%, dan 2,7%–5,84% dari total asam lemak. Selain itu, ALA dalam pakan berpotensi meningkatkan produksi LC-PUFA yang bermanfaat bagi kesehatan pada udang yang diberi pakan dengan kadar EPA dan DHA rendah, karena udang memiliki kemampuan untuk mengonversi ALA menjadi EPA dan DHA (Zheng-fu Feng, 2020).

Selama proses pematangan ovarium, *hepatopankreas* berfungsi sebagai pusat metabolisme asam amino, karbohidrat, dan lipid, serta menjadi lokasi utama terjadinya *vitellogenesis* eksogen. Sebagian besar gen yang mengode lipoprotein beserta reseptornya menunjukkan tingkat ekspresi yang dominan pada *hepatopankreas*, sedangkan *vitellogenin reseptor* (VgR)

diekspresikan secara spesifik di ovarium. Selain itu, telah diidentifikasi dua gen *vitellogenin* (Vg) dengan pola ekspresi yang berbeda, yaitu gen yang diekspresikan secara khusus pada hepatopankreas dan dikenal sebagai Hp-Vg dan gen yang diekspresikan secara spesifik pada ovarium yang disebut Ov-Vg. Kedua gen tersebut menunjukkan adanya kontribusi hepatopankreas dan ovarium dalam sintesis vitellogenin selama perkembangan gonad (Li *et al.*, 2022).



Gambar 7.1. Mekanisme regulasi *neuroendokrin* pada proses molting dan reproduksi krustasea (Sumber: Dildar, Cui and Ma, 2025)

Gambar ini memperlihatkan fungsi beberapa hormon utama, yaitu *vitellogenesis-inhibiting hormone* (VIH), *molt-inhibiting hormone* (MIH), *mandibular organ-inhibiting hormone* (MOIH), dan *crustacean hyperglycemic hormone* (CHH) dalam mengendalikan proses fisiologis penting seperti proses *vitellogenesis*, pergantian kulit, dan perkembangan ovarium. Ilustrasi tersebut menggambarkan hubungan antara kompleks tangkai mata, sistem saraf pusat, dan kelenjar ekdisial (*Y-organ*) dalam pengaturan sekresi hormon yang dipengaruhi oleh faktor

lingkungan, seperti intensitas cahaya dan suhu. Interaksi hormonal tersebut berperan dalam menyelaraskan proses reproduksi dengan siklus molting dan pematangan ovarium melalui integrasi respons terhadap kondisi lingkungan eksternal (Dildar, Cui and Ma, 2025).

Analisis metabolomik juga menunjukkan bahwa konsentrasi vitamin D3 dan vitamin E pada ovarium matang mengalami peningkatan lebih dari lima kali lipat, sedangkan kadar vitamin A mengalami penurunan. Hal ini mengindikasikan bahwa vitamin D3 dan vitamin E berperan dalam memberikan perlindungan antioksidan serta berkontribusi dalam pengaturan proses perkembangan oosit. Kandungan kolesterol dan sn-gliserol-3-fosfat terdeteksi pada ovarium yang telah mencapai kematangan, menunjukkan peran kedua komponen tersebut dalam mendukung biosintesis hormon steroid serta pembentukan dan pemeliharaan struktur membran oosit (Ji *et al.*, 2022). Kajian mengenai fisiologi ovarium pada organisme akuatik menunjukkan bahwa kolesterol dan karotenoid merupakan nutrisi esensial yang berperan penting dalam mendukung proses *vitellogenesis* dan meningkatkan kualitas larva yang dihasilkan. Namun, penerapan sumber nutrisi tersebut dalam formulasi pakan untuk induk perlu mempertimbangkan aspek ekonomi, mengingat tingginya biaya bahan baku seperti minyak krill dan kolesterol murni (Dildar, Cui and Ma, 2025b).

Pada kegiatan budidaya perairan, karbohidrat berperan sebagai sumber energi non-protein yang memungkinkan protein dimanfaatkan secara efisien untuk mendukung fungsi reproduksi. Penggunaan pakan dengan kandungan protein 32% dan rasio karbohidrat terhadap protein (C/P) sebesar 13 yang disuplementasi dengan 0,05% *cinnamaldehyde* terbukti meningkatkan pemanfaatan karbohidrat melalui peningkatan aktivitas enzim *heksokinase* (HK) dan *phosphoenolpyruvate carboxykinase* (PEPCK). Perlakuan tersebut dapat mempertahankan retensi protein, retensi lemak, dan menghasilkan nilai *feed conversion ratio* (FCR) yang lebih baik (Hendriana *et al.*, 2024).

Kajian mengenai respons terhadap stres lingkungan pada organisme akuatik menunjukkan bahwa gangguan homeostasis energi, yang ditandai oleh penurunan kadar *Adenosin Trifosfat* (ATP) serta perubahan konsentrasi glukosa, laktat, dan trigliserida, dapat memengaruhi ekspresi gen yang terlibat dalam jalur glikolisis, siklus asam trikarboksilat, dan rantai transpor elektron. Perubahan tersebut berpotensi mengurangi ketersediaan energi yang dimanfaatkan untuk proses reproduksi (Duan *et al.*, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara ketersediaan energi dan kondisi lingkungan budidaya yang optimal merupakan faktor penting dalam mendukung berlangsungnya metabolisme reproduksi secara efisien.

7.2 Metabolisme Energi Udang

Metabolisme energi pada udang merupakan landasan fisiologis yang mengintegrasikan pemanfaatan nutrisi dengan proses pertumbuhan, pergantian kulit, dan keberhasilan reproduksi. Pemanfaatan energi pada udang melibatkan koordinasi berbagai jaringan, terutama hepatopankreas, insang, usus, dan otot, melalui jalur metabolik utama yang mencakup glikolisis, siklus asam trikarboksilat, fosforilasi oksidatif, serta metabolisme lemak dan asam amino. Proses-proses tersebut berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi dan mendukung fungsi fisiologis yang terkait dengan reproduksi dan pertumbuhan (Aldersey *et al.*, 2026).

Metabolisme energi pada udang menunjukkan tingkat plastisitas yang tinggi terhadap faktor nutrisi dan kondisi lingkungan. Berbagai penelitian terkini menunjukkan bahwa perubahan kualitas protein pakan, kandungan energi yang berasal dari lemak, dan paparan stres lingkungan dapat memengaruhi pemanfaatan energi dalam tubuh. Kondisi tersebut menyebabkan pergeseran prioritas penggunaan energi dari proses pertumbuhan menuju pemeliharaan homeostasis, mekanisme detoksifikasi, dan fungsi reproduksi (Zhao *et al.*, 2025a).

Pada udang, kebutuhan energi dipenuhi melalui pemanfaatan tiga kelompok nutrisi utama, yaitu protein, lemak,

dan karbohidrat. Dalam kondisi fisiologis normal, karbohidrat berfungsi sebagai sumber energi yang cepat tersedia melalui jalur glikolisis. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan kadar piruvat dan meningkatnya ekspresi gen yang terkait dengan metabolisme glukosa, seperti *hexokinase* (hk), *pyruvate kinase* (pk), dan *pyruvate dehydrogenase* (pdh) pada insang udang yang mengalami adaptasi metabolik (Xiao et al., 2025a). Jalur metabolisme tersebut terintegrasi dengan siklus asam sitrat dan rantai transpor elektron dalam proses produksi *Adenosin Trifosfat* (ATP). Pada kondisi stres akibat alkalinitas karbonat, terjadi peningkatan ekspresi gen yang terkait dengan metabolisme energi aerobik, antara lain *citrate synthase* (cs), *octopine dehydrogenase* (odh), *succinate dehydrogenase* (sdh), *NADH dehydrogenase* (ndh), *cytochrome c* (cytc), *cytochrome c oxidase subunit I* (coi), *cytochrome c oxidase* (cco), dan *ATP synthase* (atph). Peningkatan ekspresi gen-gen tersebut menunjukkan adanya reorganisasi jalur produksi energi aerobik sebagai respons adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan (Xiao et al., 2025b).

Lemak merupakan sumber cadangan energi dengan densitas tinggi yang memiliki peranan penting pada udang, karena asam lemak dapat dimanfaatkan secara efisien untuk menghasilkan *Adenosin Trifosfat* (ATP). Peran tersebut telah dibuktikan pada berbagai krustasea budidaya, dimana peningkatan aktivitas metabolisme lemak terjadi sebagai respons kompensatorik untuk memenuhi kebutuhan energi yang meningkat (Jia et al., 2023). Pada udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), suplementasi *lisofosfolipid* dalam pakan diketahui mampu meningkatkan aktivitas enzim lipase dan menginduksi ekspresi gen yang terkait dengan metabolisme lemak, seperti *lipase* (Lip) dan *delta fatty acid desaturase 6* (dFAD-6). Peningkatan aktivitas enzim dan ekspresi gen tersebut menunjukkan bahwa strategi formulasi pakan yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan lemak sebagai sumber energi dan komponen struktural pada udang (Limwachirakhom et al., 2025).

Pada sistem budidaya perairan, protein dan asam amino tidak hanya berperan sebagai penyusun jaringan tubuh, tetapi

juga dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif ketika kebutuhan metabolik meningkat atau kualitas pakan menurun. Substitusi tepung ikan dengan protein nabati berkadar tinggi dapat menghambat aktivitas jalur *mechanistic target of rapamycin* (mTOR), menginduksi aktivasi *general control non-derepressible 2* (GCN2) dan *AMP-activated protein kinase* (AMPK). Respons molekuler tersebut mengindikasikan adanya ketidakseimbangan energi seluler disertai penurunan proses sintesis protein (Zhao *et al.*, 2025b). Pada kondisi tersebut, terjadi penurunan konsentrasi asam amino bebas pada jaringan otot disertai peningkatan akumulasi lemak di hepatopankreas. Hal ini menunjukkan bahwa ketidakseimbangan sumber protein dalam pakan dapat memengaruhi distribusi energi dan mengganggu homeostasis nutrisi pada organisme budidaya (Zhao *et al.*, 2025c).

Hepatopankreas merupakan organ utama yang berperan dalam pengaturan metabolisme energi pada udang, karena terlibat dalam berbagai fungsi fisiologis penting, termasuk pencernaan, penyimpanan cadangan energi, respons imun, proses pergantian kulit, dan aktivitas reproduksi (Aldersey *et al.*, 2026). Pada udang, paparan suhu rendah menyebabkan penurunan aktivitas jalur metabolisme energi di hepatopankreas. Namun, kondisi tersebut diikuti oleh peningkatan produksi *Adenosin Trifosfat* (ATP) dan sintesis asam lemak tidak jenuh sebagai mekanisme kompensasi untuk mempertahankan keseimbangan energi dan mendukung adaptasi fisiologis terhadap *cold stress* (Ren *et al.*, 2020).

Pada proses pertumbuhan, efisiensi metabolisme energi merupakan faktor penting yang menentukan performa individu. Pada udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) dengan laju pertumbuhan yang rendah, terjadi peningkatan katabolisme asam lemak dan aktivitas siklus *asam trikarboksilat* (TCA), yang menunjukkan bahwa sebagian besar energi dialokasikan untuk mempertahankan homeostasis dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan, dibandingkan untuk mendukung akumulasi biomassa (Zhang *et al.*, 2025a). Sebaliknya, individu dengan laju pertumbuhan yang tinggi menunjukkan peningkatan aktivitas jalur metabolisme *retinol*, *glutathion*, *riboflavin*, dan

purin. Kondisi ini mengindikasikan kapasitas toleransi terhadap stres yang lebih baik serta efisiensi pemanfaatan energi yang lebih tinggi, sehingga mendukung pertumbuhan dan akumulasi biomassa secara optimal (Zhang *et al.*, 2025b).

Metabolisme energi memiliki hubungan yang erat dengan proses pergantian kulit, karena tahapan ini membutuhkan koordinasi yang kompleks antara pemanfaatan nutrisi, regulasi hormonal, dan ketersediaan *Adenosin Trifosfat* (ATP) dalam jumlah tinggi. Pada udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), gangguan pada gen *LvChia2* dilaporkan menyebabkan penurunan performa pertumbuhan, memicu respons kompensasi metabolik pada berbagai jaringan, dan menurunkan kandungan lemak kasar pada otot. Selain itu, perubahan tersebut membentuk jaringan regulasi yang melibatkan metabolisme energi, pengendalian proses pergantian kulit, dan pemanfaatan nutrisi secara terintegrasi (Li *et al.*, 2025a). Hasil penelitian ini juga mengungkapkan adanya peningkatan ekspresi gen yang mengode subunit *ATP synthase* dan *NADH dehydrogenase*, yang mengindikasikan terjadinya penyesuaian mekanisme transduksi energi didalam mitokondria sebagai respons adaptif terhadap kondisi stres metabolik (Li *et al.*, 2025b).

Pada proses reproduksi, ketersediaan energi berperan penting dalam menentukan kecepatan pematangan gonad, kualitas oosit, dan kapasitas pemijahan. Pada induk udang vaname (*Penaeus vannamei*) dengan performa reproduksi yang tinggi, dimana oosit pada tahap awal perkembangan diketahui memiliki jumlah retikulum endoplasma, ribosom, mitokondria, dan krista mitokondria yang lebih banyak. Selain itu, analisis transkriptom menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada ekspresi gen-gen yang berkaitan dengan fungsi mitokondria antara kelompok induk dengan kemampuan reproduksi tinggi dan rendah, yang mengindikasikan pentingnya metabolisme energi dalam mendukung keberhasilan reproduksi (J. Zhang *et al.*, 2024a). Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa kapasitas produksi energi pada ovarium merupakan salah satu faktor kunci yang memengaruhi variasi tingkat perkembangan gonad di antara individu (J. Zhang *et al.*, 2024b).

Secara perspektif bioenergetika, proses reproduksi merupakan hasil dari distribusi energi antara kebutuhan pemeliharaan, pertumbuhan, dan pembentukan gamet. Penerapan model *Dynamic Energy Budget* (DEB) pada udang putih cina (*Fenneropenaeus chinensis*) menunjukkan bahwa parameter bioenergetik, seperti kapasitas cadangan energi (*reserve capacity*), kebutuhan pemeliharaan somatik (*somatic maintenance*), serta proporsi distribusi energi untuk pertumbuhan dan pemeliharaan dapat digunakan untuk memprediksi berbagai respons fisiologis, termasuk laju respirasi, ekskresi amonia, konsumsi pakan, pertumbuhan, dan performa reproduksi dengan tingkat akurasi yang memadai (Yang *et al.*, 2020). Distribusi energi pada organisme akuatik menunjukkan bahwa keberhasilan reproduksi ditentukan oleh keseimbangan antara cadangan energi yang telah terakumulasi sebelum fase reproduksi dan energi yang diperoleh selama periode reproduksi. Pola distribusi tersebut bersifat dinamis yang dapat dipengaruhi oleh status fisiologis individu dan kondisi lingkungan (Mcbride *et al.*, 2015).

Stres akibat penurunan kualitas air dapat menyebabkan pergeseran distribusi energi dari proses pertumbuhan dan reproduksi menuju mekanisme pemeliharaan dan kelangsungan hidup. Paparan nitrit diketahui mampu mengganggu homeostasis metabolik, menurunkan fungsi mitokondria, serta memberikan dampak negatif terhadap proses pertumbuhan dan kinerja reproduksi pada udang (Bian *et al.*, 2025). Pada udang windu (*Penaeus monodon*), stres amonia akut menyebabkan peningkatan kadar amonia dan nitrogen urea yang disertai dengan meningkatnya aktivitas enzim *glutamine synthetase* (GS), *glutamate dehydrogenase* (GDH), dan *glutamate oxaloacetate transaminase* (GOT). Kondisi ini menunjukkan bahwa energi dan metabolisme nitrogen dialihkan untuk mendukung proses detoksifikasi amonia. Selain itu, peningkatan aktivitas *superoxide dismutase* (SOD) mengindikasikan adanya respons antioksidasi dan peningkatan *reactive oxygen species* (ROS) (Ding *et al.*, 2025).

Faktor manajemen budidaya juga berperan dalam memengaruhi metabolisme energi pada krustasea. Peningkatan kepadatan tebar diketahui dapat memicu stres oksidatif,

mengganggu metabolisme *Adenosin Trifosfat* (ATP), menyebabkan disfungsi pada proses fosforilasi oksidatif, dan meningkatkan aktivitas beberapa jalur metabolisme lemak sebagai mekanisme adaptasi untuk mempertahankan keseimbangan fisiologis (Jia *et al.*, 2023). Selain itu, komposisi mikrobiota usus dan keberadaan probiotik memiliki keterkaitan erat dengan metabolisme lemak, karbohidrat, protein, dan asam amino. Oleh karena itu, manipulasi komunitas mikroba melalui aplikasi probiotik berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan nutrisi, memperkuat kapasitas adaptasi metabolik dan ketahanan fisiologis pada udang (Ringø *et al.*, 2022).

7.3 Suplemen Nutrisi Terhadap Pematangan Gonad dan Kualitas Benih

Proses pematangan gonad pada udang sangat dipengaruhi oleh ketersediaan lemak yang memadai, khususnya asam lemak esensial dan sterol. Komponen-komponen tersebut berperan penting sebagai sumber energi, penyusun utama membran sel, dan prekursor dalam biosintesis hormon yang mengatur fungsi reproduksi (Dildar, Cui and Ma, 2025b). Pada induk udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), suplementasi *arachidonic acid* (ARA) selama fase awal pematangan gonad terbukti meningkatkan sintesis estradiol, indeks gonadosomatik, tingkat pemijahan, frekuensi pemijahan berulang, fekunditas, diameter telur terfertilisasi, daya tetas, ketahanan larva stadia nauplius dan zoea terhadap kondisi salinitas rendah. Peningkatan performa reproduksi tersebut lebih optimal pada pemberian *arachidonic acid* (ARA) dengan dosis sedang dibandingkan dengan dosis yang lebih tinggi (Xu *et al.*, 2017).

Hasil yang serupa juga dilaporkan pada udang galah (*Macrobrachium rosenbergii*), di mana suplemen *arachidonic acid* (ARA) mampu meningkatkan *indeks gonadosomatik* (GSI), *indeks hepatosomatik* (HSI), bobot massa telur, fekunditas, daya tetas, jumlah larva yang dihasilkan, dan toleransi larva terhadap kondisi salinitas rendah. Hal ini memiliki hasil yang nyata ketika *arachidonic acid* (ARA) diberikan dalam kombinasi dengan komposisi minyak yang kaya akan *linoleic acid* dan *docosahexaenoic acid* (DHA), sehingga mendukung performa reproduksi dan kualitas larva secara lebih optimal (Kangpanich *et al.*, 2016). Secara fisiologis, *arachidonic*

acid (ARA) memiliki peran penting yang berfungsi sebagai prekursor sintesis prostaglandin yang terlibat dalam pengaturan proses reproduksi pada krustasea. Dengan demikian, *arachidonic acid* (ARA) tidak hanya berperan sebagai komponen struktural, tetapi juga bertindak sebagai mediator dalam mekanisme pensinyalan yang mengatur fungsi reproduksi (Kangpanich *et al.*, 2016).

Fosfolipid, khususnya yang berasal dari minyak krill, telah terbukti berperan sebagai suplemen penting dalam mendukung pematangan ovarium. Secara mekanistik, suplemen minyak krill mampu memodifikasi profil lemak ovarium dalam mengatur metabolisme *gliserofosfolipid*, *sfolipid*, asam lemak, dan *arachidonic acid* (ARA). Perubahan tersebut mendukung akumulasi *trigliserida* dan *sterol* didalam gonad dan meningkatkan aktivitas jalur pensinyalan hormonal yang berperan dalam proses reproduksi (Liang *et al.*, 2022b). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian pada lobster air tawar cakar merah betina (*female redclaw crayfish*), yang menunjukkan bahwa suplementasi lesitin, terutama yang berasal dari minyak krill, mampu meningkatkan *indeks gonadosomatik* (GSI), *deposisi yolk granule*, perkembangan dan pematangan oosit, kadar hormon yang berperan dalam stimulasi gonad, dan kapasitas antioksidan. Penelitian ini mengindikasikan bahwa sumber fosfolipid berbasis minyak krill berkontribusi positif terhadap performa reproduksi dan status fisiologis krustasea (Xu *et al.*, 2023).

Sterol, khususnya kolesterol, merupakan komponen nutrisi esensial dalam pakan udang karena organisme ini memiliki kemampuan yang sangat terbatas, bahkan tidak mampu untuk mensintesis sterol secara endogen. Oleh karena itu, kebutuhan kolesterol harus dipenuhi melalui asupan pakan guna mendukung berbagai fungsi fisiologis, termasuk pertumbuhan dan reproduksi (Liang *et al.*, 2025). Pada induk udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), suplementasi kolesterol sebesar 1,4% dalam pakan terbukti mampu meningkatkan *indeks gonadosomatik* (GSI) dan *indeks hepatosomatik* (HSI), serta mendorong akumulasi *trigliserida* dan kolesterol di *hepatopankreas*. Selain itu, suplementasi tersebut meningkatkan konsentrasi hormon estradiol, progesteron, dan methyl farnesoate, yang berkaitan dengan peningkatan ekspresi gen *vitellogenin* (Vg), *reseptor vitellogenin* (Vgr), dan gen-gen yang terlibat dalam jalur

steroidogenesis. penelitian ini menunjukkan bahwa kolesterol berperan penting dalam mendukung perkembangan gonad dan regulasi reproduksi pada udang (Liang *et al.*, 2023).

Selain lemak, vitamin yang berperan sebagai antioksidan dan vitamin yang terlibat dalam diferensiasi jaringan embrio juga memberikan kontribusi penting terhadap kualitas telur dan larva. Pada udang harimau jepang (*Marsupenaeus japonicus*), suplementasi vitamin C dan vitamin E tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap fekunditas, namun mampu meningkatkan daya tetas telur dan mempercepat metamorfosis larva dari stadia nauplius ke zoea. Selain itu, kedua vitamin tersebut menunjukkan efek sinergis dalam jaringan induk dan telur yang mengindikasikan perannya dalam mendukung perkembangan embrio dan meningkatkan kualitas larva (Nguyen *et al.*, 2012). Penelitian ini menunjukkan bahwa suplementasi vitamin dalam pakan induk selama fase pematangan gonad lebih berperan dalam meningkatkan kualitas telur dan benih yang dihasilkan, dibandingkan dalam meningkatkan jumlah telur atau fekunditas secara langsung (Nguyen *et al.*, 2012).

Aditif fungsional lainnya juga menunjukkan potensi yang menjanjikan dalam mendukung reproduksi udang. Pada induk udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), suplementasi campuran nukleotida terbukti meningkatkan indeks hepatopankreas, fekunditas absolut, diameter telur, kandungan asam lemak n-3 PUFA pada ovarium, dan berbagai parameter kesehatan hemolimfa. Penelitian ini mengindikasikan bahwa penambahan nukleotida dalam pakan tidak hanya berpotensi meningkatkan performa reproduksi, tetapi juga mendukung kondisi fisiologis dan kesehatan induk secara keseluruhan (Arshadi *et al.*, 2018). Secara umum, berbagai kajian terkini menunjukkan bahwa suplementasi nukleotida berkontribusi positif terhadap performa reproduksi induk, kualitas larva, peningkatan ketahanan terhadap stres dan penyakit pada ikan maupun udang (Hossain, Koshio and Kestemont, 2020).

DAFTAR PUSTAKA

- Aldersey, J. E., Abernathy, J. W., Lange, M. D., García, J. C., Shoemaker, C. A., & Beck, B. H. (2026). Single-cell transcriptomics of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) hepatopancreas reveal immune and metabolic responses to AHPND-causing *Vibrio parahaemolyticus*. *Frontiers in Immunology*, 17. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2026.1713369>
- Arshadi, A., Yavari, V., Oujifard, A., Mousavi, S. M., Gisbert, E., & Mozanzadeh, M. T. (2018). Dietary nucleotide mixture effects on reproductive and performance, ovary fatty acid profile and biochemical parameters of female Pacific shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Nutrition*, 24(1), 515–523. <https://doi.org/10.1111/anu.12584>
- Bian et al. (2025). Nitrite Toxicity in Shrimp Aquaculture: Mechanisms, Health Impacts, and Sustainable Mitigation Strategies. *Aquaculture*, 17(4).
- Dildar, T., Cui, W., & Ma, H. (2025a). Physiology of Ovarian Development in Crustaceans: Interactions Among Hormones, Nutrients, and Environmental Factors From Integrated Perspectives. In *Aquaculture Nutrition* (Vol. 2025, Number 1). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1155/anu/4900891>
- Dildar, T., Cui, W., & Ma, H. (2025b). Physiology of Ovarian Development in Crustaceans: Interactions Among Hormones, Nutrients, and Environmental Factors From Integrated Perspectives. In *Aquaculture Nutrition* (Vol. 2025, Number 1). John Wiley and Sons Ltd. <https://doi.org/10.1155/anu/4900891>
- Ding, Y., Jiang, S., Jiang, S., Li, Y., Yang, Q., Yang, L., Huang, J., Shi, J., Li, P., Diao, H., & Zhou, F. (2025). Metabolic Response of Black Tiger Shrimp (*Penaeus monodon*) to Acute Ammonia Nitrogen Stress. *Biology*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/biology14050501>
- Duan, Y., Zhong, G., Xiao, M., Yang, Y., Wang, Y., & Nan, Y. (2024). Integrated physiological, energy metabolism, and

- metabonomic responses indicate the stress response in the hepatopancreas of *Litopenaeus vannamei* to nitrite stress. *Aquatic Toxicology*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107164>
- Hendriana, A., Setiawati, M., Jusadi, D., Suprayudi, M. A., Ekasari, J., & Wahjuningrum, D. (2024). Dietary evaluation of cinnamaldehyde supplementation with different protein energy levels and ratios in Pacific whitleg Shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Jurnal Akuakultur Indonesia*, 23(1), 79–91. <https://doi.org/10.19027/jai.23.1.79-91>
- Hossain, Md. S., Koshio, S., & Kestemont, P. (2020). Recent advances of nucleotide nutrition research in aquaculture: a review. *Reviews in Aquaculture*, 12(2), 1028–1053. <https://doi.org/10.1111/raq.12370>
- Ji, D. W., Li, F., Hu, L. H., Luo, K., Zhang, J. M., Yan, M. C., & Zhang, M. (2022). Metabolomics analysis revealed biochemical changes in hepatopancreas and ovary of *Litopenaeus vannamei* during ovarian maturation. *Aquaculture Reports*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2022.101250>
- Jia, R., Dong, Y., Hou, Y., Feng, W., Li, B., & Zhu, J. (2023). Transcriptome Analysis Reveals the Effect of Stocking Density on Energy Metabolism in the Gills of *Cherax quadricarinatus* under Rice-Crayfish Co-Culture. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(14). <https://doi.org/10.3390/ijms241411345>
- Kangpanich, C., Pratoomyot, J., Siranonthana, N., & Senanan, W. (2016). Effects of arachidonic acid supplementation in maturation diet on female reproductive performance and larval quality of giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *PeerJ*, 2016(11). <https://doi.org/10.7717/peerj.2735>
- Li, M., Zhang, X., Jiao, L., Wang, J., He, Y., Li, S., Jin, M., Zhang, L., & Zhou, Q. (2023). Dietary protein regulates ovarian development through TOR pathway mediated protein metabolism in female *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture Reports*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101781>

- Li, S., Lei, Y., Liu, Q., Li, Q., Yang, C., Huang, Y., Zeng, D., Zhou, L., Peng, M., Chen, X., Wang, F., & Zhao, Y. (2025a). Multidimensional Regulatory Mechanisms of LvChia2 on Growth in the Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Genes*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/genes16091110>
- Li, S., Lei, Y., Liu, Q., Li, Q., Yang, C., Huang, Y., Zeng, D., Zhou, L., Peng, M., Chen, X., Wang, F., & Zhao, Y. (2025b). Multidimensional Regulatory Mechanisms of LvChia2 on Growth in the Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Genes*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/genes16091110>
- Li Xinyu and Han, T. and Z. S. and W. G. (2021). Nutrition and Functions of Amino Acids in Aquatic Crustaceans. In G. Wu (Ed.), *Amino Acids in Nutrition and Health: Amino Acids in the Nutrition of Companion, Zoo and Farm Animals* (pp. 169–198). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54462-1_9
- Li, Z., Zhou, M., Ruan, Y., Chen, X., Ren, C., Yang, H., Zhang, X., Liu, J., Li, H., Zhang, L., Hu, C., Chen, T., & Wu, X. (2022). Transcriptomic analysis reveals yolk accumulation mechanism from the hepatopancreas to ovary in the pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.948105>
- Liang, X., Luo, X., Chang, T., Han, F., Xu, C., & Li, E. (2023). Positive effects of optimal dietary cholesterol levels on the ovary development and health of female Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei* broodstock. *Aquaculture*, 577. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739987>
- Liang, X., Luo, X., Lin, H., Han, F., Qin, J. G., Chen, L., Xu, C., & Li, E. (2022a). Effects and Mechanism of Different Phospholipid Diets on Ovary Development in Female Broodstock Pacific White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.830934>
- Liang, X., Luo, X., Lin, H., Han, F., Qin, J. G., Chen, L., Xu, C., & Li, E. (2022b). Effects and Mechanism of Different Phospholipid Diets on Ovary Development in Female Broodstock Pacific

- White Shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Frontiers in Nutrition*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.830934>
- Liang, X., Xiao, X., Gao, X., Wen, M., Song, Y., Xu, C., Han, F., & Li, E. (2025). Comparative study on the role of various sterols in enhancing ovarian development and metabolic functions in Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) broodstock. *Aquaculture*, 597. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741934>
- Limwachirakhom, R., Triwutanon, S., Zhang, Y., & Jintasataporn, O. (2025). Effects of dietary lysophospholipids on the performance of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed fish oil- and energy-reduced diets. *Frontiers in Marine Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1624057>
- Mcbride, R. S., Somarakis, S., Fitzhugh, G. R., Albert, A., Yaragina, N. A., Wuenschel, M. J., Alonso-Fernández, A., & Basilone, G. (2015). Energy acquisition and allocation to egg production in relation to fish reproductive strategies. *Fish and Fisheries*, 16(1), 23–57. <https://doi.org/10.1111/faf.12043>
- Nguyen, B. T., Koshio, S., Sakiyama, K., Harakawa, S., Gao, J., Mamauag, R. E., Ishikawa, M., & Yokoyama, S. (2012). Effects of dietary vitamins C and E and their interactions on reproductive performance, larval quality and tissue vitamin contents in kuruma shrimp, *Marsupenaeus japonicus* Bate. *Aquaculture*, 334–337, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.044>
- Ren, X., Yu, Z., Xu, Y., Zhang, Y., Mu, C., Liu, P., & Li, J. (2020). Integrated transcriptomic and metabolomic responses in the hepatopancreas of kuruma shrimp (*Marsupenaeus japonicus*) under cold stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111360>
- Ringø, E., Harikrishnan, R., Soltani, M., & Ghosh, K. (2022). The Effect of Gut Microbiota and Probiotics on Metabolism in Fish and Shrimp. In *Animals* (Vol. 12, Number 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ani12213016>

- Xiao, M., Nan, Y., Li, J., Wang, Y., Zhu, R., & Duan, Y. (2025a). Changes in the energy metabolism of the gills of *Litopenaeus vannamei* under carbonate alkalinity stress and recovery conditions. *Frontiers in Marine Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1571396>
- Xiao, M., Nan, Y., Li, J., Wang, Y., Zhu, R., & Duan, Y. (2025b). Changes in the energy metabolism of the gills of *Litopenaeus vannamei* under carbonate alkalinity stress and recovery conditions. *Frontiers in Marine Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1571396>
- Xu, C., Yang, X., Liang, Z., Jiang, Z., Chen, H., Han, F., Jia, Y., & Li, E. (2023). Evaluation of the Role of Soybean Lecithin, Egg Yolk Lecithin, and Krill Oil in Promoting Ovarian Development in the Female Redclaw Crayfish *Cherax quadricarinatus*. *Aquaculture Nutrition*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/6925320>
- Xu, H., Zhang, Y., Luo, K., Meng, X., Luan, S., Cao, B., Chen, B., Liang, M., & Kong, J. (2017). Arachidonic acid in diets for early maturation stages enhances the final reproductive performances of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 479, 556–563. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.06.037>
- Yang, T., Ren, J. S., Kooijman, S. A. L. M., Shan, X., & Gorfine, H. (2020). A dynamic energy budget model of *Fenneropenaeus chinensis* with applications for aquaculture and stock enhancement. *Ecological Modelling*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109186>
- Zhang, J., Kong, J., Cao, J., Dai, P., Chen, B., Tan, J., Meng, X., Luo, K., Fu, Q., Wei, P., Luan, S., & Sui, J. (2024a). Reproductive Ability Disparity in the Pacific Whiteleg Shrimp (*Penaeus vannamei*): Insights from Ovarian Cellular and Molecular Levels. *Biology*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/biology13040218>
- Zhang, J., Kong, J., Cao, J., Dai, P., Chen, B., Tan, J., Meng, X., Luo, K., Fu, Q., Wei, P., Luan, S., & Sui, J. (2024b). Reproductive Ability Disparity in the Pacific Whiteleg Shrimp (*Penaeus vannamei*): Insights from Ovarian Cellular and Molecular

- Levels. *Biology*, 13(4).
<https://doi.org/10.3390/biology13040218>
- Zhang, X., Ma, B., Li, P., Chen, T., Ren, C., Hu, C., & Luo, P. (2025a). Integrative Utilization of Transcriptomics and Metabolomics Sheds Light on Disparate Growth Performance of Whiteleg Shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(7).
<https://doi.org/10.3390/ijms26073133>
- Zhang, X., Ma, B., Li, P., Chen, T., Ren, C., Hu, C., & Luo, P. (2025b). Integrative Utilization of Transcriptomics and Metabolomics Sheds Light on Disparate Growth Performance of Whiteleg Shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(7).
<https://doi.org/10.3390/ijms26073133>
- Zhang, X., Yin, Y., Fan, H., Zhou, Q., & Jiao, L. (2024). Arginine Promoted Ovarian Development in Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei* via the NO-sGC-cGMP and TORC1 Signaling Pathways. *Animals*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/ani14131986>
- Zhao, R., Wang, X., Zhou, H., Liu, C., Mai, K., & He, G. (2025a). Replacing fishmeal with composite plant protein meal affects nutrient metabolism via mTOR signaling pathway of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Animal Nutrition*, 23, 30–43.
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.04.014>
- Zhao, R., Wang, X., Zhou, H., Liu, C., Mai, K., & He, G. (2025b). Replacing fishmeal with composite plant protein meal affects nutrient metabolism via mTOR signaling pathway of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Animal Nutrition*, 23, 30–43.
<https://doi.org/10.1016/j.aninu.2025.04.014>
- Zheng-fu Feng, W. D. F. B. W. Z. (2020). Influence of dietary n-3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs) on growth, PUFA composition and the expression of FAD6 and ELOV5 in pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research*, 52.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/are.15019>

BAB 8

PRODUKSI BENIH UDANG BERKELANJUTAN (INTEGRASI BIOTEKNOLOGI, MANAJEMEN HATCHERY, DAN PRINSIP KEBERLANJUTAN PRODUKSI BENIH)

Sektor perikanan budidaya merupakan salah satu pilar penting dalam pembangunan ekonomi nasional yang berperan dalam mendukung ketahanan pangan, meningkatkan devisa negara, serta menyediakan lapangan kerja bagi masyarakat. Seiring dengan meningkatnya permintaan produk perikanan di pasar domestik maupun internasional, pengembangan perikanan budidaya menjadi salah satu sektor yang memiliki prospek sangat menjanjikan bagi perekonomian Indonesia.

Sebagai negara kepulauan dengan sumber daya perairan yang melimpah, Indonesia memiliki potensi lahan budidaya yang sangat besar, yaitu mencapai 17,91 juta hektare. Potensi tersebut meliputi lahan budidaya air tawar seluas 2,8 juta hektare (15,8%), lahan budidaya air payau seluas 2,96 juta hektare (16,5%), dan lahan budidaya laut seluas 12,12 juta hektare (67,7%). Ketersediaan sumber daya tersebut menjadi modal penting dalam mendukung peningkatan produksi akuakultur nasional secara berkelanjutan (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2025) .

Di antara berbagai komoditas akuakultur yang berkembang di Indonesia, udang merupakan salah satu komoditas unggulan yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan berorientasi ekspor. Komoditas ini menjadi penyumbang terbesar dalam ekspor

perikanan Indonesia dengan nilai mencapai USD 1,68 miliar atau sekitar 28,2% dari total nilai ekspor perikanan nasional (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2025).

Data produksi tahun 2025 memperlihatkan adanya tren pertumbuhan yang positif pada sektor udang nasional, dengan peningkatan produksi sekitar 7,32% dibandingkan tahun sebelumnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa komoditas udang memiliki prospek yang sangat menjanjikan serta berperan penting sebagai salah satu produk unggulan yang mendukung daya saing ekspor perikanan Indonesia di pasar global (BPPMHKP KKP, 2026).

Selain berorientasi pada peningkatan produksi dan jaminan mutu, pengembangan industri udang juga diarahkan pada penerapan prinsip budidaya berkelanjutan dalam kerangka ekonomi biru. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada peningkatan produktivitas, tetapi juga memperhatikan keberlanjutan lingkungan, efisiensi pemanfaatan sumber daya, serta peningkatan kesejahteraan para pelaku usaha di sektor perikanan (BPPMHKP KKP, 2026).

Peningkatan permintaan pasar global terhadap komoditas udang mendorong pengembangan sistem budidaya yang lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan. Dalam rantai produksi budidaya udang, ketersediaan benih yang berkualitas merupakan faktor fundamental yang menentukan keberhasilan kegiatan pembesaran dan produktivitas secara keseluruhan. Menurut (Lestari *et al.*, 2022) ketersediaan benur yang berkualitas dari *hatchery* merupakan salah satu faktor penentu budidaya udang di tambak. Benih yang sehat, seragam, dan memiliki performa pertumbuhan yang baik akan menghasilkan tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi serta meningkatkan efisiensi produksi pada tahap pembesaran. Dengan demikian, industri pembenihan *hatchery* memiliki peran yang sangat penting sebagai fondasi utama dalam mendukung keberlanjutan produksi udang nasional maupun global (Paul *et al.*, 2025)

Hal ini sejalan dengan pendapat (Anam *et al.*, 2016) yang menyatakan bahwa tingkat keberhasilan budidaya udang sangat ditentukan oleh kualitas pembenihan yang dilakukan di *hatchery*,

sehingga ketersediaan benur yang berkualitas menjadi salah satu faktor kunci dalam keberhasilan budidaya di tambak.

Udang vannamei (*Litopenaeus vannamei*) merupakan komoditas akuakultur unggulan di Indonesia yang produksinya sangat bergantung pada ketersediaan benur berkualitas. Fase pembenihan (hatchery) merupakan tahap kritis yang menentukan kualitas dan kuantitas benur (Bibin *et al.*, 2025).

Perkembangan industri budidaya udang yang semakin pesat menuntut adanya transformasi menuju sistem produksi benih yang lebih modern, efisien, dan berkelanjutan. Berbagai inovasi teknologi telah mulai diterapkan dalam industri pembenihan, antara lain penggunaan probiotik dan imunomodulator, penerapan biosecurity berbasis bioteknologi, pemanfaatan teknologi *Internet of Things* (IoT), serta sistem kontrol otomatis dalam pengelolaan hatchery. Integrasi teknologi tersebut berpotensi meningkatkan produktivitas, memperkuat pencegahan penyakit, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, serta meminimalkan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas budidaya (Paul *et al.*, 2025). Namun demikian, penerapan teknologi tersebut masih menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan kajian mengenai dampak lingkungan jangka panjang dan minimnya analisis ekonomi, khususnya pada negara-negara berkembang. Oleh karena itu, dukungan penelitian yang berkelanjutan, kebijakan yang adaptif, serta penerapan teknologi yang sesuai dengan kondisi lokal menjadi faktor penting dalam mendukung keberlanjutan industri akuakultur udang.

Meskipun industri perbenihan udang mengalami perkembangan yang cukup pesat, berbagai tantangan masih menjadi kendala dalam menghasilkan benih yang berkualitas dan berkelanjutan. Intensifikasi budidaya yang semakin tinggi menyebabkan meningkatnya risiko serangan penyakit, penurunan kualitas lingkungan, serta meningkatnya tekanan terhadap sumber daya perairan. Penyakit seperti *White Spot Syndrome Virus* (WSSV), *Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease* (AHPND), dan *Infectious Myonecrosis Virus* (IMNV) masih menjadi faktor pembatas utama yang menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan dalam industri udang. Selain itu, sistem produksi

yang kurang memperhatikan aspek biosecurity dapat meningkatkan peluang masuknya patogen dan menurunkan kualitas benih yang dihasilkan (Patanasatienkul *et al.*, 2023).

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan produksi benih udang tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis semata, tetapi juga memerlukan pendekatan yang terintegrasi antara penerapan bioteknologi, manajemen hatchery yang efektif, serta prinsip-prinsip keberlanjutan.

Seiring berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, paradigma produksi benih udang telah bergeser ke arah pendekatan yang lebih holistik dan berkelanjutan. Integrasi bioteknologi modern—seperti seleksi genetik berbasis marker, diagnostik molekuler, dan aplikasi probiotik—dengan manajemen hatchery yang baik (*good hatchery practices/GHP*) dan prinsip-prinsip keberlanjutan lingkungan, kini menjadi fondasi bagi industri pembenihan udang yang kompetitif dan ramah lingkungan.

Sejalan dengan hal tersebut, Bab 8 “Produksi Benih Ugang Berkelanjutan: Integrasi Bioteknologi, Manajemen Hatchery, dan Prinsip Keberlanjutan Produksi Benih” disusun untuk menguraikan berbagai perkembangan dan inovasi dalam sistem produksi benih udang modern yang mendukung produktivitas sekaligus keberlanjutan. Bab ini membahas secara komprehensif tiga pilar utama produksi benih udang berkelanjutan: (1) bioteknologi terapan dalam hatchery, (2) manajemen operasional hatchery modern, dan (3) indikator serta strategi keberlanjutan produksi benih. Pemahaman yang mendalam terhadap ketiga aspek ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi akademisi, praktisi, dan pemangku kebijakan dalam memperkuat sistem produksi benur nasional.

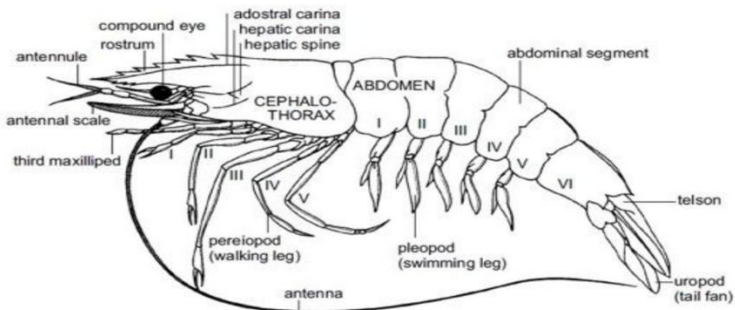
8.1 Biologi dan Siklus Hidup Ugang

8.1.1 Karakteristik Biologi Ugang Budidaya

Ugang merupakan kelompok krustasea dari ordo Decapoda yang memiliki peranan penting dalam industri akuakultur global. Spesies yang paling banyak dibudidayakan saat ini adalah udang vaname (*Litopenaeus vannamei*), yang

berasal dari kawasan Pasifik Timur dan telah berkembang menjadi komoditas utama di berbagai negara produsen udang, termasuk Indonesia. Keunggulan utama udang vaname meliputi laju pertumbuhan yang cepat, kemampuan adaptasi terhadap kisaran salinitas yang luas, toleransi terhadap kepadatan tebar tinggi, serta produktivitas yang relatif lebih tinggi dibandingkan spesies lainnya (Tian *et al.*, 2024).

Menurut (Purnamasari Indah, Purnama Dewi, 2017) udang vaname (*Litopenaeus vannamei*) merupakan salah satu komoditas perikanan bernilai ekonomi tinggi yang menjadi alternatif utama dalam budidaya udang di Indonesia, selain udang windu (*Penaeus monodon*) dan udang putih (*Penaeus merguensis*). Dari aspek taksonomi, *L. vannamei* termasuk dalam ordo Decapoda yang memiliki karakteristik serupa dengan lobster, kepiting, dan kelompok udang lainnya, yaitu adanya karapas yang berkembang dan menyatu menutupi bagian kepala serta dada membentuk cephalothorax. Udang vaname juga diklasifikasikan ke dalam famili Penaeidae karena memiliki kemampuan melepaskan telur yang kemudian menetas di luar tubuh induk betina serta memiliki struktur tanduk kepala (rostrum). Ciri khas genus *Penaeus* ditandai dengan keberadaan gigi pada bagian atas dan bawah rostrum yang memanjang, dengan jumlah 2–4 gigi pada tepi dorsal rostrum. Menurut Wahyudewantoro (2011), panjang tubuh udang vaname dapat mencapai sekitar 23 cm, sedangkan induk betina mampu mencapai bobot hingga 120 gram (Wahyudewantoro, 2011).



Gambar 8.1. Morfologi Udang (Sucharita *et al.*, 2013)

Secara morofologi, tubuh udang vaname terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu bagian kepala (*cephalothorax*) dan bagian perut (*abdomen*). Pada bagian kepala terdapat antenula dan antena sebagai alat peraba, serta dilengkapi dengan mandibula dan sepasang maksila yang berperan dalam proses pengambilan makanan. Selain itu, bagian kepala memiliki lima pasang kaki jalan (*pereopod*) yang didukung oleh dua pasang *maxillae* dan tiga pasang *maxilliped*. Bagian abdomen tersusun atas enam ruas yang masing-masing dilengkapi dengan lima pasang kaki renang (*pleopod*). Pada ujung tubuh terdapat sepasang *uropod* yang berbentuk seperti kipas, serta telson yang terletak di antara kedua *uropod* tersebut. Struktur ini berfungsi untuk menjaga keseimbangan dan membantu pergerakan udang saat berenang (Gambar 8.1) (Ramadani *et al.*, 2023).

Udang putih (*Litopenaeus vannamei*) merupakan organisme heteroseksual (dioecious), sehingga individu jantan dan betina dapat dibedakan dengan jelas. Pada umur yang sama, udang betina umumnya memiliki laju pertumbuhan yang lebih cepat sehingga ukuran tubuhnya cenderung lebih besar dibandingkan dengan udang jantan. Secara alami, udang putih bersifat nokturnal, yaitu lebih aktif mencari makan pada malam hari, sedangkan pada siang hari sebagian besar individu bersembunyi di dalam substrat atau lumpur. Dalam sistem budidaya tambak, pola pemberian pakan dapat diatur dengan frekuensi yang lebih tinggi untuk mendukung dan mempercepat pertumbuhan. Pertumbuhan udang pada dasarnya dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu frekuensi pergantian kulit (molting) yang ditunjukkan oleh interval waktu antar-molting, serta peningkatan ukuran atau laju pertumbuhan yang terjadi setiap kali proses molting berlangsung (Wahyudewantoro, 2011).

Selain faktor genetik, pertumbuhan dan performa reproduksi udang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan kualitas pakan. Pemberian nutrisi yang seimbang, pengelolaan kualitas air yang baik, serta pemeliharaan induk yang optimal akan menghasilkan kualitas telur dan larva yang lebih baik. Oleh karena itu, pemahaman terhadap aspek biologi udang menjadi dasar penting dalam mendukung keberhasilan

sistem pembenihan dan produksi benih yang berkelanjutan (Ramli *et al.*, 2023).

8.1.2 Siklus Hidup dan Tahapan Perkembangan Larva

Fase nauplius merupakan tahap awal perkembangan larva udang setelah telur menetas. Pada fase ini, tubuh larva masih sangat sederhana dan belum berkembang secara sempurna. Organ-organ tubuh belum terbentuk secara kompleks, serta larva hanya memiliki beberapa kaki renang (thoracopoda) yang berfungsi untuk pergerakan. Kebutuhan energi pada tahap ini masih dipenuhi oleh cadangan kuning telur (yolk) yang tersimpan di dalam tubuh, sehingga nauplius belum memerlukan pakan dari luar. Lama fase ini berlangsung selama beberapa hari dan dipengaruhi oleh jenis udang serta kondisi lingkungan, terutama suhu perairan. Setelah melewati tahap nauplius, larva akan memasuki fase zoea yang ditandai dengan perkembangan struktur tubuh yang lebih sempurna dan mulai munculnya kemampuan untuk memperoleh pakan. Oleh karena itu, fase nauplius memegang peranan penting dalam menentukan keberhasilan perkembangan larva menuju tahap berikutnya dan merupakan periode kritis dalam kegiatan pembenihan udang (Sari *et al.*, 2024).

Perkembangan larva udang vaname berlangsung melalui beberapa stadia, yaitu nauplius, zoea, mysis, dan post larva. Pada tahap nauplius, larva masih memperoleh kebutuhan energinya dari cadangan kuning telur (*yolk*) sehingga belum memerlukan pakan dari luar. Memasuki fase zoea hingga post larva, larva mulai bergantung pada pakan eksternal untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangannya. Tahapan tersebut merupakan periode yang sangat krusial dalam pembenihan karena tingkat kelangsungan hidup larva cenderung lebih rendah dibandingkan fase lainnya, sehingga memerlukan pengelolaan dan pemeliharaan yang optimal (Putri *et al.*, 2020).

Pengelolaan fase nauplius yang tepat menjadi faktor penting dalam keberhasilan pembenihan karena tahap ini sangat menentukan tingkat kelangsungan hidup dan mutu benih yang dihasilkan. Larva pada fase nauplius memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kondisi lingkungan, seperti suhu,

salinitas, dan kualitas air. Oleh sebab itu, kestabilan parameter lingkungan harus dijaga agar perkembangan larva dapat berlangsung secara optimal. Penerapan manajemen yang baik pada fase ini akan meningkatkan keberhasilan penetasan serta mendukung kelangsungan hidup larva hingga memasuki fase zoea dan mysis. Keberhasilan tersebut pada akhirnya akan berpengaruh terhadap kualitas dan kuantitas benih udang yang dihasilkan. Dengan demikian, pengelolaan fase nauplius memerlukan perhatian khusus dan menjadi salah satu faktor penentu keberhasilan industri budidaya udang (Sari *et al.*, 2024).

8.1.3 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi Pertumbuhan dan Perkembangan Larva

Keberhasilan produksi benih udang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pemeliharaan. Menurut (Suyuti, 2018) pengamatan kualitas air merupakan kegiatan penunjang yang dapat memberikan gambaran akan kekayaan media pemeliharaan untuk pertumbuhan dan sintasan udang vaname. Parameter kualitas air yang optimal berperan penting dalam mendukung proses metabolisme, pertumbuhan, serta meningkatkan tingkat kelangsungan hidup larva. Suhu, salinitas, pH, oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), amonia, dan nitrit merupakan parameter utama yang harus dikontrol selama proses pembenihan. Kualitas air yang buruk dapat menyebabkan stres fisiologis, menghambat pertumbuhan, dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit (Rifalda *et al.*, 2023).

Tabel 8.1. Kisaran ideal untuk parameter kualitas air di hatchery

Parameter	Kisaran
Salinitas	29–34 ppt
pH	7.8–8.2
Suhu	28–32 °C
Oksigen	> 4 ppm
Logam berat	Level minimal
Besi	<1 ppm
Amoniak (NH ₃)	<0.1 ppm

Parameter	Kisaran
Nitrit (NO ₂)	< 0.1 ppm
Nitrat (NO ₃)	<10 ppm
Hydrogen sulfat (H ₂ S)	<0.003 ppm

Sumber: (*Aquaculture management and conservation service*, 2007)

Suhu optimum untuk pemeliharaan larva udang vaname berkisar antara 28–32°C dengan salinitas 28–33 ppt. Oksigen terlarut yang rendah dapat menghambat aktivitas metabolisme dan menurunkan tingkat kelangsungan hidup larva. Selain itu, akumulasi amonia dan nitrit akibat sisa pakan dan bahan organik yang tidak terdekomposisi secara sempurna dapat bersifat toksik dan menyebabkan gangguan fisiologis pada larva (Ramli *et al.*, 2023).

Selain faktor fisika kimia perairan, upaya peningkatan hasil produksi pada pemeliharaan larva udang vanname salah satunya ditunjang oleh jenis dan ketersediaan pakan. Pakan alami merupakan pakan utama dan memiliki peran penting dimana baik secara jenis, kualitas maupun ketersediaannya dalam jumlah yang tepat akan menunjang pertumbuhan yang optimal dan keberhasilan produksi (Aonullah dan Manida, 2022). Pakan alami dapat dibedakan menjadi dua golongan yaitu plankton nabati (fitoplankton) dan plankton hewani (zooplankton). Kedua jenis pakan alami tersebut memiliki peran penting sebagai dasar pemenuhan gizi pada saat awal kehidupan larva udang vaname sehingga tingkat keberhasilan usaha budidaya udang vaname sangat tergantung pada keberhasilan saat melewati masa awal pemeliharaan larva (Putri *et al.*, 2020). Dalam meningkatkan pertumbuhan dan kelulushidupan larva udang vaname dapat dilakukan melalui pakan alami yaitu *Artemia* sp (Ramadani *et al.*, 2023).

Pada pemeliharaan larva udang vaname, pakan yang diberikan terdapat dua jenis yaitu pakan buatan dan pakan alami. Ketersediaan pakan dalam budidaya merupakan salah satu upaya dalam meningkatkan jumlah produksi. Pakan yang diberikan dalam pemeliharaan larva udang vaname harus berkualitas tinggi, bergizi dan memenuhi syarat untuk dikonsumsi udang

serta tersedia secara terus menerus sehingga tidak mengganggu proses produksi dan dapat memberikan pertumbuhan yang optimal. Upaya dalam meningkatkan hasil produksi udang vaname dapat dilakukan dengan pemberian pakan yang sesuai kebutuhan larva udang (Putri *et al.*, 2020).

8.2 Manajemen Hatchery Dalam Produksi Benih Udang

8.2.1 Hatchery Modern

Tahap pembenihan (*hatchery*) merupakan fase yang sangat penting dalam menentukan kualitas dan jumlah benur yang dihasilkan. Pada tahap ini, kualitas air menjadi faktor utama yang berpengaruh secara langsung terhadap kondisi fisiologis, tingkat kelangsungan hidup (*survival rate*), serta kesehatan (*health rate*) larva. Oleh sebab itu, penerapan manajemen kualitas air yang efektif, menyeluruh, dan berkelanjutan pada unit hatchery merupakan aspek yang sangat penting untuk mendukung produksi benur yang berkualitas tinggi dan memiliki performa yang optimal (Bibin *et al.*, 2025).

Hatchery merupakan unit produksi yang berfungsi menghasilkan benih udang berkualitas melalui pengelolaan lingkungan yang terkontrol. Sejalan dengan perkembangan industri akuakultur, desain hatchery modern tidak hanya diarahkan untuk meningkatkan kapasitas produksi, tetapi juga menekankan efisiensi operasional, penerapan sistem biosekuriti, serta prinsip keberlanjutan lingkungan. Secara umum, fasilitas hatchery terdiri atas ruang pemeliharaan induk, bak pemijahan, bak penetasan telur, bak pemeliharaan larva, unit kultur pakan alami, tandon air laut dan air tawar, laboratorium, serta sistem pengolahan air dan limbah. Integrasi antar unit tersebut memungkinkan pengendalian kualitas air dan kesehatan organisme dilakukan secara lebih optimal, sehingga mampu meningkatkan keberhasilan produksi benih (Bibin *et al.*, 2025).

Pemeliharaan kualitas air yang optimal merupakan salah satu tantangan utama dalam akuakultur karena parameter fisikokimia, seperti suhu, pH, oksigen terlarut, kekeruhan, dan Total Dissolved Solids (TDS), sangat memengaruhi kesehatan

organisme dan keberlanjutan produksi. Ketidakstabilan parameter tersebut dapat meningkatkan risiko serangan patogen dan menyebabkan tingginya tingkat mortalitas. Namun, metode pemantauan konvensional melalui pengambilan sampel dan analisis laboratorium memiliki keterbatasan karena tidak mampu mendeteksi perubahan kualitas air secara real-time. Oleh karena itu, penerapan teknologi Internet of Things (IoT) dengan sensor berbasis jaringan nirkabel menjadi solusi yang menjanjikan untuk memantau kualitas air secara berkelanjutan, mendukung pengambilan keputusan yang cepat, serta meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem budidaya (Flores-Iwasaki *et al.*, 2025).

Hatchery atau unit pembenihan yang dikelola dengan baik merupakan faktor kunci dalam menghasilkan benih udang vaname yang berkualitas dan berkelanjutan. Permasalahan yang sering dihadapi dalam budidaya udang vaname, seperti pertumbuhan yang lambat, ukuran benur yang tidak seragam, dan rendahnya ketahanan terhadap perubahan lingkungan, umumnya berkaitan dengan kualitas benih yang dihasilkan. Kualitas benur sangat menentukan keberhasilan budidaya, sehingga produksi benih yang bermutu rendah dapat meningkatkan risiko kegagalan produksi. Oleh karena itu, diperlukan penerapan manajemen pembenihan yang efektif, didukung oleh kemampuan teknis serta sarana dan prasarana yang memadai, guna meningkatkan mutu, kualitas, dan kuantitas benih yang dihasilkan serta menjamin ketersediaan benur secara berkelanjutan (Soenarto *et al.*, 2025).

Desain hatchery modern didasarkan pada prinsip biokeamanan, efisiensi energi, dan fleksibilitas operasional. Empat komponen kritis yang sebaiknya diterapkan adalah sistem resirkulasi air (RAS), zona biosekuriti berlapis, sistem pengelolaan limbah terintegrasi, dan infrastruktur monitoring otomatis. Model budidaya intensif memungkinkan produksi dalam jumlah besar melalui penerapan padat tebar tinggi dan pemanfaatan teknologi modern, seperti aerasi mekanis, sistem resirkulasi, serta penggunaan probiotik (Lestantun *et al.*, 2020).

8.2.2 Sistem Resirkulasi (RAS)

Teknologi *Recirculating Aquaculture System* (RAS) merupakan inovasi penting dalam akuakultur modern yang bekerja dengan mendaur ulang air melalui filtrasi mekanik, kimia, dan biologis untuk menjaga kualitas air serta ketersediaan oksigen secara optimal. Sistem ini memungkinkan pemantauan dan pengendalian parameter kualitas air secara berkelanjutan, sehingga mampu menciptakan lingkungan budidaya yang stabil, meningkatkan kesehatan dan produktivitas udang vaname, serta mengurangi penggunaan air dan risiko penyakit yang disebabkan oleh penurunan kualitas media budidaya (Putra *et al.*, 2024).

Teknologi RAS merupakan sistem budidaya tertutup yang memungkinkan penggunaan air secara berulang melalui proses filtrasi dan rekayasa lingkungan air. Sistem ini tidak hanya efisien dalam penggunaan air, tetapi juga memungkinkan control penuh terhadap parameter kualitas air, sehingga lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan sistem konvensional (Harijono and Ritonga, 2025).

Tabel 8.2. Perbandingan sistem RAS dengan sistem tradisional

Aspek	Sistem Tradisional	Sistem RAS
Penggunaan air	Boros (air diganti berkala)	Hemat (hingga 90-95% air didaur ulang)
Kontrol kualitas air	Sulit dikontrol, tergantung cuaca dan lingkungan	Sangat terkendali dan stabil
Kepadatan tebar	Rendah hingga sedang	Tinggi (hingga 80-100 kg/m ³ tergantung spesies)
Pengendalian penyakit	Rentan (terbuka terhadap patogen luar)	Lebih aman (tertutup, mudah dikendalikan)
Efisiensi lahan	Membutuhkan area luas	Hemat ruang, bisa di <i>indoor</i> atau rooftop
Investasi awal	Rendah hingga sedang	Tinggi (teknologi, peralatan)

Aspek	Sistem Tradisional	Sistem RAS
Operasional	Sederhana	Kompleks dan teknis
Skalabilitas	Sulit untuk skala besar di lahan terbatas	Sangat fleksibel dan modular

Sumber: Timmons & Ebeling (2013) dalam Harijono and Ritonga, (2025)

Berdasarkan penelitian (Putra *et al.*, 2024) system RAS terbukti efektif dalam menjaga kualitas air pada budidaya udang vaname melalui pemantauan otomatis menggunakan sensor-sensor seperti sensor turbidity, TDS, pH, dan ultrasonik.

8.2.3 Penerapan Biosecurity

Biosekuriti merupakan prinsip dan tindakan yang terintegrasi untuk menganalisis dan mengelola risiko yang muncul terhadap kesehatan hewan budidaya (Mulyadin *et al.*, 2025).

Menurut (Aquaculture management and conservation service, 2007) biosekuriti merupakan serangkaian kebijakan, peraturan, dan program yang diterapkan untuk mengelola risiko penyakit dalam kegiatan pembenihan. Penerapan biosekuriti mencakup berbagai metode fisik, kimia, dan biologis yang bertujuan melindungi unit hatchery dari ancaman penyakit berisiko tinggi. Efektivitas biosekuriti dipengaruhi oleh aspek teknis, manajemen, dan ekonomi, sehingga strategi yang diterapkan harus disesuaikan dengan kondisi fasilitas, tingkat risiko penyakit, serta biaya implementasinya. Selain menjaga keberlangsungan produksi, penerapan prosedur operasional standar (SOP) dan biosekuriti yang tepat juga penting untuk mencegah penyebaran penyakit ke lingkungan sekitar, sehingga dapat melindungi kegiatan akuakultur lain serta menjaga kelestarian organisme akuatik alami.

Penerapan biosekuriti di hatchery mencakup tiga komponen utama, yaitu pencegahan, pengendalian, dan perencanaan kontingensi. Pencegahan dilakukan untuk melindungi organisme budidaya dari organisme yang tidak diinginkan, terutama patogen, serta meminimalkan dampak

negatif terhadap manusia dan ekosistem. Pengendalian mencakup pengawasan terhadap sistem budidaya, pergerakan organisme, serta pelaksanaan pemantauan dan pencatatan kegiatan yang berisiko. Sementara itu, perencanaan kontingensi bertujuan mengantisipasi berbagai kemungkinan kejadian yang dapat mengganggu produksi. Dalam hatchery udang, permasalahan biosekuriti dapat dibedakan menjadi dua kategori, yaitu biosekuriti internal yang berkaitan dengan penyebaran patogen di dalam fasilitas, dan biosekuriti eksternal yang berhubungan dengan masuk atau keluarnya patogen dari dan ke lingkungan luar (Aquaculture management and conservation service, 2007).

8.2.4 Sistem Monitoring *Real-Time* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang memungkinkan berbagai objek atau perangkat untuk saling bertukar data melalui jaringan internet tanpa memerlukan interaksi langsung antara manusia dan perangkat. Teknologi ini memanfaatkan berbagai komponen, seperti sensor, sistem komunikasi nirkabel, dan perangkat identifikasi, yang memungkinkan objek fisik direpresentasikan secara virtual dan terhubung dalam suatu jaringan. Melalui pemrograman dan konektivitas internet, perangkat-perangkat tersebut dapat berinteraksi dan bekerja secara otomatis tanpa dibatasi oleh jarak, sehingga manusia berperan sebagai pengendali dan pengawas terhadap sistem yang beroperasi secara mandiri. Penerapan IoT telah banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi pemantauan dan pengendalian pada berbagai bidang, termasuk akuakultur (Nirwana *et al.*, 2022).

Internet of Things (IoT) merupakan teknologi yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian parameter kualitas air secara *real-time* melalui integrasi sensor, mikrokontroler, dan jaringan internet. Penerapan IoT dalam akuakultur dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan, mempercepat pengambilan keputusan, serta mengurangi risiko kegagalan produksi akibat perubahan kualitas air. Berdasarkan penelitian (Nugroho *et al.*, 2025), salah satu implementasi teknologi ini adalah *Smart Water Conditioning System* (SMARCOS)

berbasis Web-IoT yang mampu memantau dan mengoreksi parameter kualitas air, seperti pH, oksigen terlarut, dan suhu secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem tersebut meningkatkan efisiensi pemantauan dan memudahkan akses informasi, sehingga berpotensi mendukung modernisasi dan produktivitas unit pembenihan perikanan.

8.3 Integrasi Bioteknologi dalam Produksi Benih Udang

Seiring dengan meningkatnya intensifikasi budidaya, penggunaan agen non-antibiotik semakin berkembang, salah satunya probiotik yang berperan penting dalam menjaga kesehatan organisme akuatik. Pemberian probiotik diketahui mampu meningkatkan pertumbuhan, efisiensi pemanfaatan pakan, ketahanan terhadap penyakit, respons imun, serta membantu memperbaiki kualitas air, sehingga mendukung keberhasilan dan keberlanjutan sistem akuakultur (Bidika Subedi & Abhimanyu Shrestha, 2020).

Upaya yang dapat dilakukan untuk mempertahankan kualitas air yang baik terutama dalam mereduksi limbah bahan organik sisa pakan adalah dengan menggunakan probiotik dan imunostimulan. Perkembangan bioteknologi telah membawa perubahan signifikan dalam industri perbenihan udang, terutama melalui pemanfaatan probiotik sebagai alternatif pengganti antibiotik dalam pengendalian penyakit dan pengelolaan kualitas air. Probiotik merupakan mikroorganisme hidup yang memberikan manfaat bagi organisme budidaya melalui perbaikan keseimbangan mikrobiota, peningkatan respons imun, serta penghambatan pertumbuhan mikroorganisme patogen. Probiotik berperan dalam memperbaiki kualitas air, menekan pertumbuhan bakteri patogen, serta meningkatkan keseimbangan mikrobiota lingkungan budidaya (Kurniawinata *et al.*, 2026).

Probiotik merupakan teknologi alternatif pengganti penggunaan antibiotik dan senyawa kimia pada industri akuakultur. Penggunaan probiotik pada budidaya intensif dapat memberikan keuntungan pada kesehatan udang vaname.

Probiotik dapat memberikan manfaat pada organisme yang dibudidayakan berupa peningkatan pertumbuhan, efektivitas pemanfaatan pakan, resistensi penyakit, respon imun dan memperbaiki kualitas air.

Penggunaan probiotik menjadi salah satu strategi yang banyak diterapkan dalam budidaya udang vaname untuk mengurangi ketergantungan terhadap antibiotik. Probiotik berfungsi memperbaiki kualitas air, menekan pertumbuhan bakteri patogen, serta menjaga keseimbangan mikrobiota pada media budidaya. Berdasarkan penelitian (Kurniawinata *et al.*, 2026) aplikasi probiotik pada sistem budidaya superintensif udang vaname terbukti mampu menekan keberadaan bakteri *Vibrio* sp. dan meningkatkan tingkat kelangsungan hidup udang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian probiotik satu kali per minggu memberikan tingkat kelangsungan hidup yang lebih tinggi dibandingkan aplikasi dua kali per minggu, sehingga pengaturan frekuensi pemberian probiotik yang tepat berpotensi mendukung keberhasilan budidaya udang secara berkelanjutan.

Teknologi Bioflok (*Biofloc Technology*/BFT) merupakan sistem budidaya intensif yang banyak diterapkan pada udang dan mulai berkembang pada komoditas akuatik lainnya. Sistem ini memanfaatkan komunitas mikroba menguntungkan yang berkembang di dalam media budidaya untuk meminimalkan pergantian air, mendaur ulang nutrisi, serta menghasilkan pakan alami berupa agregat mikroba tersuspensi (bioflok). Keberhasilan penerapan BFT tidak hanya bergantung pada pengelolaan mikroba, tetapi juga pada desain sistem, manajemen pakan, pemantauan kualitas air, dan penerapan biosekuriti yang baik. Selain meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, bioflok juga berperan dalam meningkatkan aktivitas pencernaan, kesehatan udang, serta menekan pertumbuhan mikroorganisme patogen melalui kompetisi mikroba di lingkungan budidaya. Dengan demikian, teknologi BFT menjadi salah satu pendekatan yang mendukung produktivitas dan keberlanjutan budidaya udang (Emerenciano *et al.*, 2022).

Pemanfaatan mikroorganisme dalam sistem bioflok tidak hanya berperan dalam mendaur ulang limbah nitrogen dan meningkatkan kualitas air, tetapi juga berkontribusi dalam

membentuk komunitas mikroba yang menguntungkan sehingga dapat meningkatkan kesehatan dan ketahanan udang terhadap serangan penyakit. Keberadaan mikroba yang seimbang pada media pemeliharaan mampu menekan pertumbuhan mikroorganisme patogen dan menciptakan lingkungan budidaya yang lebih stabil. Namun, intensifikasi budidaya dan tingginya kepadatan pemeliharaan tetap meningkatkan risiko munculnya berbagai penyakit infeksi yang disebabkan oleh virus, bakteri, jamur, maupun parasit. Oleh karena itu, pengelolaan kesehatan udang memerlukan sistem deteksi dan diagnosis yang akurat untuk mendukung upaya pencegahan dan pengendalian penyakit secara efektif.

Berbagai metode diagnostik telah dikembangkan untuk mengidentifikasi agen penyebab penyakit pada udang, meliputi pengamatan morfologi patologis, preparat basah (*wet mount*), histopatologi, mikrobiologi konvensional, metode bioassay, mikroskop elektron, serta teknik serologi. Metode-metode tersebut memiliki peranan penting dalam manajemen kesehatan organisme akuatik, baik untuk kegiatan surveilans pada organisme yang tampak sehat maupun untuk menentukan penyebab gangguan kesehatan secara spesifik. Seiring dengan perkembangan bioteknologi, metode molekuler seperti *one-step PCR*, *nested PCR*, RT-PCR, dan *real-time PCR* telah banyak digunakan sebagai metode diagnosis konfirmatif di laboratorium kesehatan ikan dan udang. Selain mendukung deteksi dini berbagai patogen, teknologi molekuler tersebut juga telah diaplikasikan dalam industri budidaya udang untuk meningkatkan efektivitas biosecurity dan pengelolaan kesehatan pada tingkat hatchery maupun tambak, sehingga dapat mendukung keberlanjutan produksi udang secara keseluruhan (Emerenciano *et al.*, 2022).

8.4 Prinsip Keberlanjutan Produksi Benih Udang

Keberlanjutan merupakan salah satu prinsip utama dalam pengembangan akuakultur modern yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan produksi saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memanfaatkan sumber

daya yang sama. Dalam industri perbenihan udang, konsep keberlanjutan tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas dan keuntungan ekonomi, tetapi juga mempertimbangkan aspek lingkungan, sosial, dan kesejahteraan organisme budidaya. Produksi benih yang berkelanjutan memerlukan integrasi antara teknologi, manajemen hatchery yang efisien, serta pemanfaatan sumber daya secara bertanggung jawab untuk menjaga keseimbangan ekosistem perairan (FAO, 2024).

Peningkatan intensifikasi budidaya udang dalam beberapa dekade terakhir telah memberikan kontribusi besar terhadap produksi global, namun juga menimbulkan berbagai tantangan seperti tingginya kebutuhan air, peningkatan limbah organik, penggunaan bahan kimia yang berlebihan, serta risiko penyebaran penyakit. Oleh karena itu, pendekatan keberlanjutan dalam produksi benih udang diarahkan pada penerapan teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi dampak lingkungan, dan mendukung kesehatan organisme budidaya. Konsep Blue Transformation yang diperkenalkan oleh FAO menekankan pentingnya pengembangan sistem akuakultur yang produktif, inklusif, tangguh, dan ramah lingkungan sebagai bagian dari upaya mendukung ketahanan pangan global (FAO, 2024).

Pengelolaan sumber daya yang efisien merupakan salah satu indikator utama keberhasilan sistem produksi benih udang yang berkelanjutan. Penggunaan air, energi, dan pakan yang tidak terkendali dapat meningkatkan biaya produksi sekaligus menimbulkan tekanan terhadap lingkungan. Oleh karena itu, penerapan teknologi seperti *Recirculating Aquaculture System* (RAS), bioflok, dan penggunaan probiotik menjadi alternatif yang mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya sekaligus mengurangi pencemaran lingkungan (Emerenciano *et al.*, 2022).

Perkembangan teknologi digital dan bioteknologi membuka peluang baru dalam mendukung keberlanjutan industri perbenihan udang. Penerapan *Internet of Things* (IoT), sensor kualitas air otomatis, kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), dan sistem kontrol berbasis data memungkinkan

pemantauan kondisi lingkungan secara real-time sehingga pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih cepat dan akurat. Teknologi tersebut mampu meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi risiko kegagalan, serta mendukung pengelolaan kesehatan organisme budidaya secara lebih efektif (Føre *et al.*, 2018).

Ke depan, pengembangan produksi benih udang berkelanjutan memerlukan dukungan penelitian jangka panjang mengenai dampak lingkungan, evaluasi ekonomi, serta pengembangan teknologi yang sesuai dengan kondisi lokal. Pemerintah juga memiliki peran penting dalam menyediakan regulasi dan insentif yang mendorong penerapan teknologi secara bertanggung jawab. Dengan demikian, integrasi antara bioteknologi, manajemen hatchery, dan prinsip keberlanjutan diharapkan mampu menghasilkan sistem produksi benih udang yang produktif, berdaya saing, dan mampu menjaga keseimbangan ekosistem dalam jangka Panjang (FAO, 2024).

DAFTAR PUSTAKA

- Anam, C. *et al.* (2016) “Manajemen Produksi Naupli Udang Vaname (*Litopenaeus Vannamei*) Di Instalasi Pembenihan Udang (Ipu) Gelung Balai Perikanan Budidaya Air Payau (Bpbap) Situbondo Jawa Timur Management Of Hatchery Production Naupli Vaname (*Litopenaeus Vannamei*) IN INST,” Samakia: Jurnal Ilmu Perikanan, 7(2), pp. 57–65. Available at: <http://www.samakia.aperiki.ac.id/index.php/JSAPI/article/view/104>.
- Aonullah, A.A. and Manida, A. (2022) “Aplikasi Pakan Alami Dan Buatan Pada Pemeliharaan Larva Udang Vanname (*Litopenaeus Vannamei*) Di Hatchery PT. Suri Tani Pemuka Unit Hatchery Negara, Bali,” *Chanos Chanos*, 20(2), p. 105. Available at: <https://doi.org/10.15578/chanos.v20i2.11838>.
- Aquaculture management and conservation service (2007) “Improving *Penaeus monodon* hatchery practices. Manual based on experience in India,” *FAO. Fisheries Technical Paper*, 446, p. 117. Available at: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/0e6b8d11-81ed-5afb-b374-06605dbe01d1/>.
- Bibin, M. *et al.* (2025) “STANDAR OPERASIONAL MANAJEMEN KUALITAS AIR DAN PROSES PEMBENIHAN UDANG VANNAMEI DI PT. ESAPUTLII PRAKARSA UTAMA KABUPATEN BARRU Operational,” 5(September), pp. 119–134.
- Bidika Subedi and Abhimanyu Shrestha (2020) “ A review: Application of probiotics in aquaculture,” *International Journal of Forest, Animal and Fisheries Research (IJFAF)*, 4(5 (Sep-Oct)), pp. 52–60.
- BPPMHKP KKP (2026) “Badan Pengendalian dan Pengawasan Mutu Hasil Kelautan dan Perikanan _ KKP _ Kementerian Kelautan dan Perikanan.” Jakarta. Available at: <https://kkp.go.id/bppmhkp/forum-industri-udang-bahas-masa-depan-budi-daya-berkelanjutan-dan-daya-saing-global-WQmJ/detail.html>.

- Emerenciano, M.G.C. *et al.* (2022) "Intensification of Penaeid Shrimp Culture: An Applied Review of Advances in Production Systems, Nutrition and Breeding," *Animals*, 12(3). Available at: <https://doi.org/10.3390/ani12030236>.
- FAO (2024) *World Fisheries and Aquaculture*, FAO:Rome,2020. Available at: https://www.fao.org/3/ca9229en/online/ca9229en.html#chapter-1_1.
- Flores-Iwasaki, M. *et al.* (2025) "Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis," *AgriEngineering*, 7(3), pp. 1–26. Available at: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>.
- Føre, M. *et al.* (2018) "Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture," *Biosystems Engineering*, 173, pp. 176–193. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014>.
- Harijono, T. and Ritonga, L.B. (2025) *Budidaya Ikan Sistem Resirkulasi (RAS)*. Edited by M. Sari. Get Press Indonesia.
- Kementerian Kelautan dan Perikanan (2025) *Laporan Tahunan Sumber Daya Kelautan dan Perikanan Indonesia*.
- Kurniawinata, M.I. *et al.* (2026) "EFEKTIVITAS FREKUENSI APLIKASI PROBIOTIK DAN PEMBERIAN EKSTRAK HERBAL DALAM MENEKAN *Vibrio* sp . PADA BUDIDAYA UDANG VANAME (*Penaeus vannamei*) EFFECTIVENESS OF PROBIOTIC APPLICATION FREQUENCY AND HERBAL EXTRACT SUPPLEMENTATION IN SUPPRESSING *Vibrio* sp . IN THE CULTURE OF PACIFIC WHITELEG SHRIMP (*Penaeus vannamei*)," 11.
- Lestantun, A. *et al.* (2020) "Peran Biosecurity dalam Pengendalian Penyakit pada Benih Udang Vanamei di Banten The," *Prosiding Seminar Nasional "Pembangunan Hijau dan Perizinan: Diplomasi, kesiapan perangkat dan pola standarisasi" Peran*, pp. 53–58.
- Lestari, S.A. *et al.* (2022) "ALUR PROSES PRODUKSI BENUR VANAME (*Litopenaeus vannamei*) DI PT CENTRAL PERTIWI BAHARI SHRIMP HATCHERY MAKASSAR," *Journal of Applied Agribusiness and Agrotechnology*,

20(20), p. 9.

- Mulyadin, A. *et al.* (2025) "Sosialisasi Upaya Pengendalian Penyakit Udang Vaname di Desa Maroneng, Kabupaten Pinrang," *Jurnal Abdimas BSI: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 8(1), pp. 65–73. Available at: <https://doi.org/10.31294/jabdimas.v8i1.7477>.
- Nirwana, H. *et al.* (2022) "Monitoring Kinerja Mesin Tetas Otomatis Berbasis Internet Of Things," *Jurnal Teknologi Elektroika*, 19(1), p. 37. Available at: <https://doi.org/10.31963/elekteika.v6i1.3501>.
- Nugroho, A. *et al.* (2025) "Implementasi SMARCOS: Smart Water Conditioning System Berbasis Web-IoT di Balai Benih Ikan Kecamatan Mijen Semarang," *Journal of Community Development / E-ISSN*, (6), pp. 81–89. Available at: <https://doi.org/10.47134/comdev.v6i1.1459>.
- Patanasatienkul, T. *et al.* (2023) "Survey of farm management and biosecurity practices on shrimp farms on Java Island, Indonesia," *Frontiers in Aquaculture*, 2(July), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.3389/faquc.2023.1169149>.
- Paul, M.N. *et al.* (2025) "a Review of Technological Developments in Shrimp Aquaculture Production," *Indonesian Aquaculture Journal*, 20(2), p. 157. Available at: <https://doi.org/10.15578/iaj.20.2.2025.157-172>.
- Purnamasari Indah, Purnama Dewi, dan F.U.M.A. (2017) "PERTUMBUHAN UDANG VANAME (*Litopenaeus vannamei*) DI TAMBAK INTENSIF," 2(1), pp. 58–67.
- Putra, R.A. *et al.* (2024) "Teknologi Recirculating Aquaculture System untuk Penanggulangan White Feces Disease pada Budidaya Udang Vaname Berbasis IoT," *Uranus: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika*, 2(4), pp. 236–243. Available at: <https://doi.org/10.61132/uranus.v2i4.512>.
- Putri, T. *et al.* (2020) "The Effect of Artificial and Natural Feed on the Growth and Survival Rate of Vaname Shrimp (*Litopenaeus vannamei*)," *Jurnal Akuakultur Rawa Indonesia*, 8(2), pp. 176–192.
- Ramadani, M.F. *et al.* (2023) "Teknik Budidaya Udang Vaname

- Skala Super Intensif," *Jurusan Biologi Universitas Negeri Makassar*, pp. 1–40.
- Ramli, T.H. *et al.* (2023) "A Study of The Treatment of Larvae Vannamei Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) In Banyuwangi," *Jurnal Ilmiah PLATAX*, 11(1), pp. 206–216. Available at: <https://doi.org/10.35800/jip.v11i1.47714>.
- Rifalda, M.R. *et al.* (2023) "Evaluasi Performa Pertumbuhan dan Kualitas Air Udang Vannamei (*Litopenaeus vannamei*) pada Sistem Budidaya Intensif," *Jurnal Mina Sains*, 9(2), pp. 73–80.
- Sari, Z.S. *et al.* (2024) "Pendederan Nauplius Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) di PT. Suri Tani Pemuka Unit Canti, Lampung Selatan," *Journal of Amreta Meena*, 1(2), pp. 89–92.
- Soenarto *et al.* (2025) "Manajemen Produksi Benih Udang Vaname (*Penaeus vannamei*) Di PT. Suri Tani Pemuka Unit Hatchery Carita Pandeglang Banten," *ACROPORA: Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan Papua*, 8(1), pp. 9–19. Available at: <https://doi.org/10.31957/acr.v8i1.4527>.
- Sucharita, V. *et al.* (2013) "A Comparative Study on Various Edge Detection Techniques used for the Identification of Penaeid Prawn Species," *International Journal of Computer Applications*, 78(6), pp. 1–5. Available at: <https://doi.org/10.5120/13490-1198>.
- Suyuti, R.B.M. (2018) "Analisis Perkembangan Gonad Calon Induk Udang Vaname (*Litopenaeus Vannamei*) Hasil Domestikasi Melalui Pemberian Pakan Buatan Dengan Berbagai Sumber Protein Tepung Yang Berbeda." Available at: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/192023/>.
- Tian, J. *et al.* (2024) "Development Dilemma of *Litopenaeus vannamei* Industry in China, Current Countermeasures Taken and Its Implications for the World Shrimp Aquaculture Industry," *Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh*, 76(3), pp. 106–116. Available at: <https://doi.org/10.46989/001c.122102>.
- Wahyudewantoro (2011) "Catatan Biologi Udang Putih *Litopenaeus vannamei*," *Fauna Indonesia*, Vol 10(2), pp. 1–7.

BAB 9

“BIOTEKNOLOGI REPRODUKSI UDANG DALAM AKUAKULTUR MODERN: KENDALA IMPLEMENTASI DAN TANTANGAN ETIKA”

Akuakultur merupakan salah satu sektor produksi pangan dibidang perikanan yang mengalami pertumbuhan paling cepat, salah satunya adalah Komoditas udang. Udang memiliki keunggulan yaitu produktivitas tinggi, adaptasi lingkungan yang baik dan permintaan pasar yang terus meningkat. Dengan adanya peningkatan jumlah permintaan udang sampai di pasar internasional menjadikan tantangan dalam produksi udang secara keberlanjutan. Adapun hal-hal yang harus diperhatikan dimulai dari menjaga kualitas induk supaya tidak terjadi penurunan, meningkatkan keberhasilan reproduksi di lingkungan budidaya, penanganan kualitas air yang baik sehingga udang terhindar dari penyakit, hingga menjaga lingkungan supaya tidak terjadi degradasi akibat intensifikasi produksi udang. Oleh karena itu, penerapan bioteknologi reproduksi menjadi kebutuhan strategis dalam mendukung keberlanjutan industri akuakultur modern. (Food and Agriculture Organization, 2024).

Bioteknologi reproduksi mencakup berbagai teknik yang bertujuan meningkatkan efisiensi reproduksi organisme budidaya melalui manipulasi genetik, fisiologis, maupun lingkungan. Dalam industri udang, teknologi tersebut meliputi seleksi genetik, genomic selection, kriopreservasi gamet, manipulasi hormon reproduksi, pemanfaatan biofloc untuk peningkatan performa induk, hingga pendekatan multi-omics yang mampu mengidentifikasi mekanisme molekuler reproduksi secara lebih akurat (Luan, S., et al., 2024). Meskipun

perkembangan teknologi berlangsung cepat, tingkat penerapan di negara berkembang masih relatif rendah. Hal ini terjadi karena kendala teknis, ekonomi, sosial, regulasi, dan etika menjadi faktor utama yang menghambat implementasi teknologi reproduksi secara luas. Oleh karena itu, diperlukan kajian komprehensif mengenai peluang, tantangan, dan strategi pengembangan bioteknologi reproduksi udang dalam konteks akuakultur modern.

9.1 Landasan Bioteknologi Reproduksi Udang

Bioteknologi akuakultur terdiri dari penerapan teknik ilmiah untuk meningkatkan reproduksi udang, perbaikan genetik, pengendalian penyakit, konservasi sumber daya genetik, dan meningkatkan produktivitas budidaya (FAO, 2024). Adapun bioteknologi dalam reproduksi udang dapat dikelompokkan menjadi empat pendekatan utama yaitu :

9.1.1 Seleksi Genetik dan Pemuliaan

Seleksi genetik Adalah metode sering diterapkan untuk menghasilkan populasi udang dengan pertumbuhan yang cepat, tingkat kelangsungan hidup yang tinggi, dan tahan terhadap penyakit. Pendekatan ini berkembang dari seleksi fenotipik konvensional menuju genomic selection berbasis SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*). Menurut Luan et al., (2024) sistem *Open Nucleus Breeding System* (ONBS) yang digabungkan dengan genomic selection mampu meningkatkan kemajuan genetik lebih dari 10% dibandingkan sistem pemuliaan tertutup tradisional (*Closed Breeding System*).

9.1.2 Manipulasi Kematangan Gonad

Manipulasi kematangan gonad Adalah salah satu cara merangsang atau mempercepat perkembangan ovarium (betina) atau testis (jantan) sehingga induk udang lebih cepat mencapai kondisi matang gonad dan siap untuk memijah. Produksi benih udang secara komersial masih banyak bergantung pada teknik ablasi tangkai mata (*eyestalk ablation*). Metode tersebut efektif mempercepat kematangan gonad, tetapi menimbulkan persoalan

kesejahteraan hewan oleh karena itu, berbagai penelitian mulai mengembangkan alternatif berbasis hormon reproduksi, nutrigenomik, dan regulasi molekuler yang lebih ramah terhadap organisme budidaya (Montaya, et.al., 2019).

9.1.3 Pendekatan Multi-Omics

Pendekatan *multi-omics* adalah cara komprehensif untuk memahami proses pematangan gonad pada udang, mulai dari kualitas induk, perkembangan telur dan sperma, hingga faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan pemijahan. Melalui genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik, pendekatan ini memungkinkan identifikasi gen-gen yang mengontrol reproduksi. Teknologi *multi-omics* berpeluang menghasilkan biomarker reproduksi yang lebih akurat karena mampu memetakan jaringan hormon dan gen untuk optimalisasi pematangan induk (Sittikanka et al., 2025).

9.2.1.4 Kriopreservasi dan Konservasi Genetik

Kriopreservasi merupakan teknik menyimpan sel, jaringan, atau materi genetik pada suhu sangat rendah. Bahan yang digunakan biasanya nitrogen cair sekitar -196°C sehingga aktivitas biologisnya hampir berhenti dan dapat dipertahankan dalam waktu yang sangat lama. Pada reproduksi udang, kriopreservasi dapat diterapkan pada sperma udang dan jaringan reproduksi untuk menjaga keragaman genetik populasi induk. Teknologi ini mendukung program pemuliaan jangka panjang serta mengurangi risiko kehilangan plasma nutfah akibat perubahan lingkungan dan penyakit (FAO, 2024).

9.2 Perkembangan Bioteknologi Reproduksi Dalam Akuakultur Modern

Perkembangan bioteknologi reproduksi pada udang mulai mengalami perubahan paradigma, industri tidak hanya berfokus pada peningkatan jumlah produksi udang, tetapi peningkatan proses reproduksi udang untuk menghasilkan benih berkualitas, meningkatkan produktivitas, dan mendukung industri budidaya yang berkelanjutan. Salah satu inovasi yang berkembang adalah

integrasi *biofloc technology* (BFT) dalam manajemen induk. Sistem ini menyediakan sumber nutrisi alami yang mampu meningkatkan perkembangan gonad, mempercepat proses pematangan gonad, serta meningkatkan kualitas larva yang dihasilkan (Zhao, et al., 2024). Selain itu, teknologi genomik breeding dapat mengidentifikasi individu yang unggul berdasarkan marker molekuler. Pendekatan ini menghasilkan proses seleksi yang lebih cepat dibandingkan metode konvensional.

Pada beberapa negara teknologi *marker-assisted selection* (MAS) dan *genomic selection* mulai digunakan untuk menghasilkan strain udang tahan terhadap penyakit dan memiliki performa reproduksi yang lebih baik (Xu, W., Liu, Y., Li, M., Lu, S., & Chen, S., 2024).

Perkembangan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) sudah mulai digunakan dalam pemantauan kualitas air, tingkah laku reproduksi udang, dan performa induk. Pada masa depan penggabungan AI dengan bioteknologi dapat diperkirakan menjadi arah utama industri akuakultur (Paul, M. N., et.al., 2025)

9.3 Kendala Implementasi Bioteknologi Reproduksi Udang

Bioteknologi reproduksi pada udang berkembang menjadi salah satu pendekatan penting dalam menunjang industri akuakultur modern. Teknologi ini terdiri dari berbagai metode seperti manipulasi pematangan gonad, inseminasi buatan, kriopreservasi sperma, seleksi genetik, pemuliaan berbasis marker, hingga penerapan biologi molekuler untuk meningkatkan kualitas induk dan benih yang unggul. Penerapan bioteknologi reproduksi bertujuan meningkatkan produktivitas, kualitas genetik yang tahan terhadap penyakit dan keberlanjutan dalam produksi udang budidaya (Le Vay et al., 2001). Oleh karena itu, implementasi berbagai teknologi reproduksi pada udang masih menghadapi banyak kendala, baik dari aspek biologis, teknis, ekonomi, lingkungan, maupun sosial. Kendala-kendala tersebut mengakibatkan keterlambatan dalam proses

pengambilan teknologi pada tingkat hatchery dibandingkan dengan potensi yang dimiliki pada teknologi tersebut.

9.3.1 Kendala Biologis

1. Kompleksitas Sistem Reproduksi Udang

Keberhasilan reproduksi udang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti umur induk, nutrisi yang diberikan, faktor lingkungan, dan faktor genetik yang saling berinteraksi secara kompleks (Browdy, 1998). Sedangkan proses pematangan gonad pada udang dipengaruhi oleh kerja hormon yang disekresikan oleh organ neuroendokrin, seperti tangkai mata, otak, dan organ reproduksi.

Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai mekanisme regulasi ini sangat diperlukan untuk pengembangan teknologi reproduksi yang konsisten (Benzie, 2009).

2. Variabilitas Kualitas Induk

Kualitas induk merupakan faktor yang menentukan keberhasilan reproduksi, akan tetapi kebanyakan hatchery masih bergantung pada induk hasil tangkapan alam yang memiliki kualitas reproduksi yang tidak seragam. Hal ini menyebabkan perbedaan pada tingkat kematangan gonad, fekunditas, kualitas telur, dan daya tetas pada larva (Bray & Lawrence, 1992). Selain itu, penggunaan induk udang yang terus berulang dapat meningkatkan risiko inbreeding yang mengakibatkan penurunan performa reproduksi dan pertumbuhan pada larva udang (Gjedrem & Baranski, 2009).

3. Tingginya Kerentanan terhadap Penyakit

Penyakit merupakan gangguan kesehatan yang dapat menyerang udang karena infeksi mikroorganisme patogen seperti virus, bakteri, jamur, dan parasit. Hal ini menjadi kendala utama dalam implementasi bioteknologi reproduksi udang. Adapun jenis penyakit seperti White Spot Syndrome, Infectious Myonecrosis, Acute Hepatopancreatic Necrosis Disease dapat menginfeksi induk maupun larva sehingga dapat menurunkan keberhasilan reproduksi dan produksi benur (Lightner, 2011).

9.3.2 Kendala Teknis

1. Keterbatasan Teknologi Kriopreservasi

Dalam bidang reproduksi udang, kriopreservasi berpotensi mendukung konservasi plasma nutfah, program pemuliaan, dan pengelolaan sumber daya genetik. Namun, hingga saat ini penerapannya masih menghadapi berbagai kendala biologis dan teknis yang membatasi keberhasilan pelaksanaannya dalam skala industri (Bojic et al., 2021; Zhu et al., 2023). Kriopreservasi sperma memiliki potensi besar dalam konservasi plasma nutfah dan program pemuliaan dibandingkan dengan embrio dan oosit karena embrio dan oosit memiliki struktur yang kompleks, ukuran besar, kandungan lipid tinggi, dan permeabilitas membran yang rendah sehingga lebih rentan mengalami kerusakan selama proses pembekuan dan pencairan (Zhu et al., 2023)

Pada udang, kendala ini menjadi salah satu alasan mengapa bank genetik berbasis embrio belum berkembang sepesat bank sperma. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada kriopreservasi gamet jantan karena tingkat keberhasilannya lebih tinggi dibandingkan pada tahap perkembangan reproduksi lainnya (Narida et al., 2023)

Pada gamet Jantan juga masih menghadapi berbagai kendala teknis seperti : penurunan motilitas sperma, perubahan morfologi, dan berkurangnya kemampuan fertilisasi. Penurunan kualitas ini dapat memengaruhi keberhasilan pemijahan dan produksi benih dalam program budidaya (da Costa et al., 2024).

2. Ketergantungan pada Ablasi Mata

Industri pembenihan udang modern bergantung pada kemampuan hatchery untuk menghasilkan induk matang gonad secara konsisten. Salah satu metode yang paling banyak digunakan untuk merangsang pematangan ovarium adalah ablasi tangkai mata (*eyestalk ablation*). Teknik ini telah menjadi prosedur standar dalam produksi benih udang karena mampu meningkatkan frekuensi pemijahan dan produksi telur secara signifikan. Akan tetapi, ketergantungan yang tinggi terhadap metode ini menimbulkan berbagai

persoalan biologis, etika, dan keberlanjutan industri (Campbell et al., 2025)

Pada udang, tangkai mata mengandung neuroendokrin yang dapat mensekresikan berbagai hormon, salah satunya hormon penghambat reproduksi, yaitu *Gonad Inhibiting Hormone* (GIH). Ketika salah satu tangkai mata diablasi, produksi hormon penghambat menjadi menurun sehingga perkembangan ovarium menjadi lebih cepat dan terjadi proses pemijahan. Meskipun demikian penggunaan ablasi mata memiliki sejumlah dampak yaitu menurunkan kualitas telur dan meningkatkan mortalitas induk. Hal ini dibuktikan induk yang tidak diablasi dapat menghasilkan kualitas telur yang lebih baik dibandingkan induk yang diablasi (Gaxiola et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan produksi telur dari proses ablasi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kualitas reproduksi.

3. Keterbatasan Infrastruktur Laboratorium

Teknologi reproduksi modern sangat bergantung pada penggunaan laboratorium molekuler untuk analisis DNA, RNA, ekspresi gen, dan identifikasi biomarker reproduksi. Akan tetapi pengadaan peralatan seperti mesin PCR, sekuenser genom, sistem analisis protein, dan perangkat bioinformatika memerlukan biaya yang sangat besar. Oleh karena itu banyak hatchery dan institusi penelitian belum mampu menerapkan teknologi modern tersebut (Wyban, 2025). Hal ini berdampak pada penerapan teknologi reproduksi berbasis molekuler belum optimal (Gjedrem et al., 2012).

9.3.3 Kendala Ekonomi

1. Tingginya Biaya Investasi

Perkembangan bioteknologi reproduksi menjadi faktor utama dalam meningkatkan produktivitas budidaya udang. Adapun biaya investasi yang perlu dikeluarkan dalam pengembangan bioteknologi reproduksi yaitu infrastruktur hatchery, infrastruktur laboratorium, peralatan molekuler, sistem biosekuriti dan penggunaan induk bebas patogen

(*Specific Pathogen Free* atau SPF), akan tetapi penerapan teknologi-teknologi tersebut memerlukan biaya investasi yang sangat besar sehingga hal tersebut menjadi kendala bagi negara berkembang khususnya pelaku usaha akuakultur (Wyban, 2025). Biaya awal yang sangat besar menjadi salah satu faktor rendahnya aplikasi teknologi reproduksi modern pada hatchery skala kecil dan menengah (FAO, 2022).

2. Ketidakpastian Keuntungan

Teknologi reproduksi dapat meningkatkan kualitas benih akan tetapi keuntungan secara ekonomi tidak bisa langsung dirasakan. Resiko kegagalan produksi akibat penyakit atau perubahan kondisi lingkungan membuat pelaku usaha tidak tertarik berinvestasi pada teknologi baru (Rosenberry, 2023).

9.3.4 Kendala Lingkungan

1. Perubahan Iklim

Kendala terbesar dalam budidaya udang yaitu perubahan iklim seperti peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, kenaikan muka air laut, pengasaman laut (*ocean acidification*). Perubahan iklim dapat mempengaruhi sistem reproduksi udang seperti perkembangan gonad terhambat, pematangan induk, kualitas gamet, keberhasilan pemijahan, sampai tingkat kelangsungan hidup larva (Abisha et al., 2022; Mitra et al., 2023).

Kondisi lingkungan yang stabil sangat mempengaruhi proses pembenihan udang, oleh karena itu perubahan iklim menjadi salah satu kendala yang dapat memengaruhi produktivitas reproduksi dan keberlanjutan produksi benur udang. Contohnya perubahan pola curah hujan yang dipengaruhi oleh perubahan iklim dapat menyebabkan fluktuasi salinitas yang signifikan, hal ini dapat mengakibatkan stress pada udang yang berdampak pada Tingkat keberhasilan reproduksi udang (Abisha et al., 2022). Selain salinitas, perubahan suhu yang ekstrem dapat memengaruhi metabolisme, regulasi hormon reproduksi, perkembangan gonad, dan kualitas gamet yang dihasilkan (Islam et al., 2022; Lema et al., 2024).

2. Degradasi Habitat

Degradasi habitat merupakan salah satu kendala yang mempengaruhi keberlanjutan sumber daya dan keberhasilan reproduksi udang. Pada daerah pesisir seperti habitat padang lamun, estuaria, hutan mangrove dan kawasan rawa pasang surut memiliki peran penting sebagai tempat perlindungan induk udang, pemijahan, pembesaran larva, dan sebagai sumber pakan alami. Kerusakan habitat yang diakibatkan oleh aktivitas manusia berlebih dapat mempengaruhi penurunan kualitas lingkungan seperti perubahan tata guna lahan, pencemaran, kerusakan ekosistem dan perubahan iklim. Hal ini akan berdampak secara langsung maupun tidak langsung terhadap proses reproduksi udang (Boyd et al., 2022; Monsalve & Quiroga, 2022).

Pada sistem budidaya, degradasi habitat pesisir akan berdampak langsung pada operasional tambak dan *hatchery*. Menurunnya kualitas air akibat kerusakan lingkungan dapat meningkatkan risiko penyakit, pembengkakan biaya produksi dan menurunkan efisiensi reproduksi udang (Emerenciano et al., 2022).

9.3.5 Kendala Sumber Daya Manusia

1. Kurangnya Tenaga Ahli

Faktor penentu keberhasilan teknologi reproduksi udang mencakup aspek fasilitas, pendanaan, dan kualitas sumber daya manusia (SDM). Kendala yang sering muncul di lapangan adalah kurangnya tenaga ahli dan rendahnya serapan transfer teknologi dari lembaga riset ke sektor budidaya praktis (Paul et al., 2025; McDonald et al., 2024). Keterbatasan SDM menyebabkan berbagai inovasi reproduksi yang telah berhasil dikembangkan di tingkat penelitian belum dapat diterapkan secara optimal dalam skala komersial. Kondisi ini memperlebar kesenjangan antara kemajuan ilmu pengetahuan dan praktik penerapan teknologi di lapangan.

2. Rendahnya Transfer Teknologi

Transfer teknologi adalah proses penyebaran pengetahuan, inovasi, dan hasil penelitian kepada pengguna akhir, seperti

petambak, *hatchery*, dan perusahaan akuakultur. Pada sektor reproduksi udang, transfer teknologi menjadi hal yang sangat penting karena sebagian besar inovasi berasal dari lembaga penelitian dan perguruan tinggi. Namun, berbagai penelitian menunjukkan bahwa proses transfer teknologi sering menghadapi hambatan berupa keterbatasan komunikasi antara peneliti dan pelaku industri, kurangnya pelatihan teknis, serta rendahnya kapasitas pengguna dalam mengadopsi teknologi baru (Kovaleski et al., 2022). Akibatnya, banyak inovasi reproduksi yang hanya berhenti pada tahap penelitian tanpa dapat dimanfaatkan secara luas oleh industri pembenihan udang.

9.3.6 Kendala Regulasi dan Etika

1. Regulasi Organisme Hasil Rekayasa Genetik

Pemanfaatan teknologi rekayasa genetika pada udang masih menghadapi berbagai pembatasan regulasi global. Adanya perbedaan kebijakan antarnegara, ketidakjelasan klasifikasi organisme, serta kekhawatiran terhadap keamanan pangan dan lingkungan menjadi kendala utama dalam sektor reproduksi udang. Akibat kompleksitas ini, proses perizinan teknologi rekayasa genetika membutuhkan evaluasi yang panjang (FAO, 2022).

2. Isu Kesejahteraan Hewan

Kesejahteraan hewan adalah salah satu kendala krusial dalam reproduksi udang modern. Praktik ablasi mata, penanganan yang buruk, penurunan kualitas air, dan tingkat kepadatan tebar yang tinggi menjadi faktor utama yang memicu stres dan memengaruhi kesejahteraan induk udang. Seiring meningkatnya perhatian ilmiah, regulasi, dan tuntutan pasar terhadap kesejahteraan krustasea, industri akuakultur dituntut untuk mengembangkan metode reproduksi yang lebih berkelanjutan dan ramah hewan. Oleh karena itu, peningkatan kesejahteraan udang tidak hanya mendukung aspek etika, tetapi juga berkontribusi pada keberhasilan reproduksi dan keberlanjutan industri akuakultur.

9.3.7 Strategi Mengatasi Kendala

Berbagai kendala yang sering dihadapi dalam proses reproduksi udang, baik yang disebabkan oleh faktor lingkungan, kualitas induk, manajemen pemeliharaan, maupun serangan penyakit. Beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk meningkatkan keberhasilan implementasi bioteknologi reproduksi udang meliputi:

1. Pengembangan induk SPF dan SPR (*Specific Pathogen Resistant*).
2. Pengurangan penggunaan ablasi mata melalui teknologi hormonal.
3. Peningkatan program seleksi genetik berbasis marker molekuler.
4. Penguatan sistem biosekuriti *hatchery*.
5. Peningkatan kapasitas sumber daya manusia melalui pelatihan berkelanjutan.
6. Penguatan kerja sama antara akademisi, pemerintah, dan industri.
7. Pengembangan regulasi yang mendukung inovasi namun tetap memperhatikan aspek keamanan lingkungan.

9.4 Tantangan Etika Dalam Bioteknologi Reproduksi Udang

Perkembangan bioteknologi reproduksi seperti seleksi genetik, manipulasi reproduksi, dan penyuntingan genom telah meningkatkan produktivitas akuakultur secara signifikan. Namun, kemajuan ini memicu berbagai tantangan etika—mulai dari kesejahteraan hewan, keamanan lingkungan, hingga dampak sosial-ekonomi bagi pembudidaya udang. Oleh karena itu, penerapan teknologi ini menuntut perhatian tidak hanya pada aspek teknis, tetapi juga pada persoalan etis sebagai berikut :

9.4.1 Kesejahteraan Hewan

Konsep kesejahteraan hewan saat ini mulai diperluas dari hewan bertulang belakang (vertebrata) ke kelompok krustasea seperti udang. Meski kemampuan udang dalam merasakan sakit (*sentience*) masih diperdebatkan, tetapi udang yang mendapatkan tindakan ablasi terbukti mengalami stres. Hal ini

diperkuat oleh penelitian yang menunjukkan bahwa pemberian anestesi sebelum ablasi dapat menekan tingkat stres pada udang, yang menandakan adanya rasa tidak nyaman yang dirasakan udang pasca ablasi.

Berdasarkan pendekatan utilitarian, penderitaan organisme wajib dibandingkan dengan keuntungan yang dihasilkan. Hal ini memicu pertanyaan krusial: apakah efisiensi produksi industri sebanding dengan penderitaan biologis jutaan induk udang betina setiap tahunnya? Menanggapi isu ini, Campbell et al. (2025) menyebutkan bahwa tingginya kepedulian publik terhadap kesejahteraan hewan telah mendesak perusahaan ritel global untuk meninjau ulang rantai pasok yang masih mengandalkan metode ablasi standar

Ablasi Adalah salah satu isu etika paling banyak diperdebatkan dalam reproduksi udang karena teknik ini dilakukan dengan memotong salah satu tangkai mata induk udang betina untuk menekan hormon penghambat vitelogenesis sehingga mempercepat proses pematangan gonad dan meningkatkan produksi telur. Teknik ablasi tangkai mata dapat menimbulkan stres dan rasa sakit pada induk udang betina meskipun teknik ini menjadi fondasi keberhasilan industri hatchery udang global karena mampu meningkatkan frekuensi pemijahan dan jumlah telur yang dihasilkan. Namun demikian, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa prosedur tersebut dapat menimbulkan stres fisiologis, perubahan perilaku, penurunan sistem imun, dan peningkatan mortalitas induk udang (Montoya et.al., 2019)

Sebagai respons terhadap kritik tersebut, berbagai penelitian mulai mengembangkan alternatif non-ablasi melalui manipulasi lingkungan, nutrisi, regulasi hormonal, RNAi, dan pendekatan molekuler lainnya. Walaupun efektivitas ekonominya belum sepenuhnya menyamai metode konvensional, pendekatan ini dianggap lebih sejalan dengan prinsip kesejahteraan hewan modern (Fajardo, C., et.al., 2024)

9.4.2 Erosi Keanekaragaman Genetik dan Tanggung Jawab Konservasi

Keanekaragaman genetik memberikan kemampuan adaptasi bagi spesies untuk bertahan dari penyakit dan perubahan lingkungan (Kumar et al., 2022). Saat ini, program pemuliaan modern cenderung berfokus pada sifat-sifat unggul seperti pertumbuhan cepat, fekunditas tinggi, dan tahan terhadap penyakit. Meski efektif meningkatkan produktivitas, seleksi yang terlalu intensif berisiko terjadinya menyempitkan basis genetik populasi. Dari sudut pandang etika lingkungan, manusia memiliki tanggung jawab moral untuk melestarikan sumber daya genetik sebagai warisan biologis masa depan. Penurunan keragaman ini berpotensi meningkatkan risiko kepunahan massal akibat ketidakmampuan spesies merespons ancaman lingkungan yang dinamis. Adapun dampak dari [pengurangan keragaman generic dapat meningkatkan resiko seperti :

1. Inbreeding depression.
2. Penurunan kemampuan adaptasi.
3. Kerentanan terhadap penyakit baru.
4. Hilangnya alel-alel penting yang belum diketahui manfaatnya.

Xu dan Jin (2025) menekankan bahwa keberhasilan program genomik harus diimbangi dengan strategi konservasi plasma nutfah untuk mencegah kehilangan sumber daya genetik secara permanen. Oleh karena itu, pengembangan bioteknologi reproduksi tidak boleh hanya mengejar efisiensi ekonomi, tetapi juga harus mempertimbangkan tanggung jawab etis terhadap pelestarian biodiversitas.

9.4.3 Rekayasa Genetik dan Penerimaan Publik

Rekayasa genetik pada reproduksi udang adalah suatu inovasi yang menjanjikan untuk meningkatkan produktivitas, kualitas benih, dan ketahanan terhadap penyakit dalam industri akuakultur. Teknologi seperti CRISPR/Cas9 memungkinkan modifikasi gen yang lebih presisi sehingga dapat mempercepat pengembangan galur unggul. Namun, keberhasilan

penerapannya tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh penerimaan publik, keamanan hayati, regulasi yang memadai, dan komunikasi ilmiah yang transparan. Hal ini perlu dilakukan untuk mengatasi masyarakat yang masih memiliki kekhawatiran mengenai keamanan pangan, dampak ekologis, dan aspek moral penggunaan organisme hasil modifikasi genetik (Lal, J., et.al., 2024). Melalui pendekatan yang baik dan bertanggung jawab, rekayasa genetik berpotensi mendukung keberlanjutan produksi udang di masa depan.

9.4.4 Keadilan Akses Teknologi

Bioteknologi reproduksi modern membutuhkan investasi besar dalam infrastruktur laboratorium, fasilitas hatchery, bioinformatika, dan sumber daya manusia. Oleh karena itu, sebagian besar inovasi hanya dapat dimanfaatkan oleh perusahaan besar atau kelompok industri yang memiliki modal yang besar. Keadaan ini menimbulkan pertanyaan mengenai keadilan distributive : siapa yang memperoleh manfaat terbesar dari inovasi bioteknologi?

Jika akses terhadap teknologi hanya dimiliki oleh beberapa perusahaan, maka kesenjangan antara industri pembudidaya skala besar dan pembudidaya skala kecil dapat semakin melebar. Oleh karena itu, distribusi manfaat inovasi perlu menjadi perhatian dalam kebijakan pembangunan akuakultur (N'Souvi, K., et.al., 2024)

DAFTAR PUSTAKA

- Benzie, J. A. H. (2009). *Use and exchange of genetic resources of penaeid shrimps for food and aquaculture*. FAO Fisheries Technical Paper No. 572.
- Boyd, C. E., Davis, R. P., & McNevin, A. A. (2022). *Perspectives on the mangrove conundrum, land use, and benefits of yield intensification in farmed shrimp production: A review*. *Journal of the World Aquaculture Society*, 53(1), 8–46.
- Bojic, S., Murray, A., Bentley, B. L., Spindler, R., Pawlik, P., Cordeiro, J. L., Bauer, R., & de Magalhães, J. P. (2021). Winter is coming: The future of cryopreservation. *BMC Biology*, 19(56), 1–15.
- Bray, W. A., & Lawrence, A. L. (1992). Reproduction of penaeid shrimp in captivity. In A. W. Fast & L. J. Lester (Eds.), *Marine shrimp culture: Principles and practices* (pp. 93–170). Elsevier.
- Craig L. Browdy (1998). *Recent developments in penaeid broodstock and seed production technologies: improving the outlook for superior captive stocks*. *Aquaculture*, 164, 3–21
- Campbell, D. L. M., Coman, G. J., Lee, C., Schmoelzl, S., & Rombenso, A. N. (2025). *The shrimp welfare dilemma: A scientific perspective on eyestalk ablation*. *Reviews in Aquaculture*, 17(4), 1–20.
- da Costa, B. B., Lassen, P. G., & Streit, D. P. (2024). Cryopreservation-induced morphological changes in freshwater fish sperm: A systematic review. *Biopreservation and Biobanking*, 22(5), 1–13.
- Emerenciano, M. G. C., Rombenso, A. N., Vieira, F. N., Martins, M. A., Coman, G. J., Truong, H. H., Noble, T. H., & Simon, C. J. (2022). *Intensification of penaeid shrimp culture: An applied review of advances in production systems, nutrition and breeding*. *Animals*, 12(3), 236.
- Fajardo, C., De Donato, M., Macedo, M., Charoonnart, P., Saksmerprom, V., Yang, L., Purton, S., Mancera, J. M., &

- Costas, B. (2024). RNA interference applied to crustacean aquaculture. *Biomolecules*, 14(11), 1358.
- FAO. (2022). *The state of world fisheries and aquaculture 2022: Towards blue transformation*. Rome: Food and Agriculture Organization.
- Food and Agriculture Organization. (2024). *Biotechnologies in fisheries and aquaculture*. FAO. (FAOHome)
- Food and Agriculture Organization. (2024). *Aquaculture breeding and genetics*. FAO E-learning Academy. (Akademi e-Learning FAO)
- Gaxiola, G., Magaña-Gallegos, E., Arévalo, M., & Cuzon, G. (2021). Effects of using the biofloc system and eyestalk ablation on reproductive performance and egg quality of *Litopenaeus vannamei*. *Animal Reproduction Science*, 228, 106749.
- 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. *Aquaculture*, 350–353, 117–129.
- Kumar, A., Choudhury, B., Dayanandan, S., & Khan, M. L. (Eds.). (2022). *Molecular genetics and genomics tools in biodiversity conservation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6005-4>
- Kovaleski, F., Picinin, C. T., & Kovaleski, J. L. (2022). *The challenges of technology transfer in the Industry 4.0 era regarding anthropotechnological aspects: A systematic review*. *SAGE Open*, 12(3), 1–15
- Lal, J., Vaishnav, A., Singh, S. K., et al. (2024). Biotechnological innovation in fish breeding: From marker assisted selection to genetic modification. *Discover Biotechnology*, 1(7).
- Le Vay, L., Lebata, J., Walton, M., Primavera, J., & Quinitio, E. (2001). Approaches to stock enhancement in crustaceans. *Aquaculture Research*, 32(suppl. 1), 1–12.
- Lightner, D. V. (2011). Virus diseases of farmed shrimp in the Western Hemisphere. *Veterinary Research*, 42(1), 1–13.

- Luan, S., et al. (2024). Optimal open nucleus breeding system for long-term genetic gain in the Pacific white shrimp using genomic selection. *Aquaculture*, 586, 740760.
- McDonald, N., Lovric, K., & Cosby, A. (2024). *Skill development in current and future workers to thrive in the digital aquaculture industry*. *Aquaculture Journal*, 4(1), 15–27.
- Monsalve, E. R., & Quiroga, E. (2022). *Farmed shrimp aquaculture in coastal wetlands of Latin America: A review of environmental issues*. *Marine Pollution Bulletin*, 183, 113956.
- Narida, A., Tsai, S., Huang, C.-Y., Wen, Z.-H., & Lin, C. (2023). The effects of cryopreservation on the cell ultrastructure in aquatic organisms. *Biopreservation and Biobanking*, 21(1), 59–72.
- N'Souvi, K., Sun, C., Che, B., & Vodounon, A. (2024). Shrimp industry in China: Overview of the trends in the production, imports and exports during the last two decades, challenges, and outlook. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1287034. (Frontiers)
- Paul, M. N., Kasan, N. A., Oben, B. O. M., & Osho, F. E. (2025). *A review of technological developments in shrimp aquaculture production*. *Indonesian Aquaculture Journal*, 20(2), 87–104
- Rosenberry, B. (2023). *World shrimp farming 2023*. San Diego: Shrimp News International.
- Sittikanka, S., et al. (2025). Towards overcoming shrimp maturation challenges in aquaculture production using multi-omics approaches: A review in captive penaeid shrimp. *Aquaculture Reports*, 103301.
- Xu, W., Liu, Y., Li, M., Lu, S., & Chen, S. (2024). Advances in biotechnology and breeding innovations in China's marine aquaculture. *Advanced Biotechnology*, 2(38).
- Xu, P., & Jin, L. (2025). Genomic evolution of growth and reproduction related genes in shrimp. *International Journal of Marine Science*, 15(3), 154–166.
- Zhao, et al. (2024). Broodstock and seed production in biofloc technology (BFT): An updated review focused on fish and penaeid shrimp. *Aquaculture*, 579, 740278.

Zhu, X., Miller-Ezzy, P., Zhao, Y., Qin, J., Tang, Y., Liu, Y., & Li, X. (2023). Lipid modification to improve cryotolerance of gametes, embryos and larvae and its potential application in aquaculture species: A review. *Frontiers in Marine Science*, 10, Article 1235958.

BIODATA PENULIS



Lorichika Gustinda Larasati, S.Pi., M.Si., M.Sc.

Dosen Tetap PNS (angkatan 2025) pada Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman

Lorichika Gustinda Larasati, S.Pi., M.Si., M.Sc. lahir di Surabaya, 25 Mei 1998. Saat ini merupakan Dosen Tetap PNS (angkatan 2025) pada Program Studi Akuakultur, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Jenderal Soedirman.

Beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana Akuakultur di Universitas Airlangga dan Magister melalui program *double degree Biotechnology of Fisheries and Marine* di Universitas Airlangga (Indonesia) dan *National Pingtung University of Science and Technology* (Taiwan). Bidang keahlian meliputi bioteknologi molekuler perikanan, khususnya imunologi udang vaname, probiotik, dan analisis ekspresi gen.

Fokus riset mencakup bioteknologi reproduksi, mikrobiologi akuakultur, imunologi udang, serta diagnostik molekuler, dengan minat pada pengembangan akuakultur berkelanjutan.

Memiliki sertifikasi *Academic Research Ethics Education* (AREE) dan ISO 14001:2015 *Awareness*. Prestasi internasional yang diraih antara lain peringkat ke-4 (*excellent work*) pada *The Fisheries Society of Taiwan Annual Meeting* tahun 2024.

BIODATA PENULIS



Dewi Nuryanti Fazrin, S.Pi., M.Si
Dosen Jurusan Budidaya Perairan
Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan
Universitas Negeri Gorontalo

Lahir di Gorontalo 11 September 1989 merupakan akademisi dan peneliti di bidang perikanan yang berfokus pada Perikanan dan Kelautan. Saat ini menjadi dosen Program Studi Studi Budidaya Perairan Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan Universitas Negeri Gorontalo. Menamatkan pendidikan S1 di program studi Budidaya Perairan Fakultas Ilmu Ilmu Pertanian Universitas Negeri Gorontalo pada tahun 2011, dan melanjutkan S2 di Program Magister Ilmu Perikanan dan Kelautan di Pasca Sarjana Universitas Negeri Gorontalo pada tahun 2020. Mengampu mata kuliah Tehnik Budidaya Ikan Endemik, Bioaktif Perikanan dan Aquaculture Enggining. Selain aktif dalam kegiatan penelitian, penulis juga melaksanakan berbagai kegiatan pengabdian kepada masyarakat dan publikasi ilmiah yang berhubungan dengan Perikanan dan kelautan. Email : dewhyfazrin@ung.ac.id

BIODATA PENULIS



Mita Alvionita, S.Pi., M.Si.

Dosen Jurusan Budidaya Perairan
Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan
Universitas Negeri Gorontalo

Penulis Lahir di Gorontalo 11 Maret 1995 merupakan akademisi dan peneliti di bidang perikanan yang berfokus pada perikanan dan akuakultur. Saat ini menjadi dosen tetap pada Program Studi Budidaya Perairan Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan Universitas Negeri Gorontalo. Mita menamatkan pendidikan S1 di program studi Budidaya Perairan Universitas Negeri Gorontalo pada tahun 2017, dan melanjutkan S2 di Program Magister Ilmu Kelautan Universitas Negeri Gorontalo yang diselesaikannya pada tahun 2022. Mengampu mata kuliah Parasit dan Penyakit Ikan, Budidaya Pakan Alami, Teknologi dan Budidaya Rumpuk Laut, Dasar – dasar Genetika Ikan. Selama ini terlibat aktif dalam penelitian dan publikasi ilmiah yang berhubungan dengan akuakultur dan kesehatan ikan.

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Marita Ika Joesidawati, ST,M.Si
Dosen Fakultas Perikanan dan Kelautan

Penulis lahir di Surabaya tanggal 7 Maret 1971. Penulis adalah dosen tetap pada Universitas PGRI Ronggolawe yang berlokasi di Kabupaten Tuban Jawa Timur sejak tahun 1994 sampai sekarang. Menyelesaikan pendidikan S1 Ilmu Kelautan dan S2 Manajemen Pantai di Universitas Diponegoro Semarang. Gelar Doktor Teknologi Kelautan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada tahun Oktober 2025 memperoleh Gelar jabatan akademik Guru Besar dengan bidang kepakaran Pengelolaan Wilayah Pesisir dan Laut Berbasis Bioteknologi Kelautan. Penelitian yang banyak dilakukan adalah dampak perubahan iklim dan mitigasi degradasi sumberdaya pesisir. Dalam kegiatan kemasayarakatan berfokus pada pemberdayaan masyarakat pesisir dan adaptasinya terhadap perubahan dinamika pesisir untuk mendukung pangan berkelanjutan dan ekonomi biru.

BIODATA PENULIS



Riska Puluhulawa, S.Pi., M.Si.

Dosen Program Studi Budidaya Perairan
Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan
Universitas Negeri Gorontalo

Penulis lahir di Gorontalo tanggal 15 Oktober 1996. Pendidikan Sarjana di Jurusan Budidaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Negeri Gorontalo telah diselesaikan penulis pada tahun 2018. Melanjutkan pendidikan pada tahun yang sama pada Program Magister Program Studi Ilmu Akuakultur, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor dan lulus pada tahun 2021.

Penulis saat ini mengabdikan ilmu dan pengetahuannya sebagai seorang dosen di Jurusan Budidaya Perairan, Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan, Universitas Negeri Gorontalo.

BIODATA PENULIS



Atma Jaya Salman Muin, S.Pi., M.Si.

Dosen Program Studi Budidaya Perairan
Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan
Universitas Negeri Gorontalo

Penulis lahir di Pangkajene Kepulauan tanggal 14 Mei 1992. Saat ini penulis aktif sebagai dosen CPNS pada Program studi Budidaya Perairan, Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan, Universitas Negeri Gorontalo.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada Jurusan Budidaya Perairan dan melanjutkan pendidikan Magister (S2) pada Jurusan Ilmu Akuakultur. Fokus keilmuan dan minat penelitian penulis meliputi nutrisi ikan, manajemen pakan, lingkungan budidaya dan pengembangan budidaya berkelanjutan.

Selain aktif dalam kegiatan pengajaran, penulis juga terlibat dalam penelitian dan pengabdian kepada masyarakat dibidang perikanan dan akuakultur. Penulis berharap buku ini dapat memberikan manfaat dan menjadi sumber referensi bagi mahasiswa, akademisi dan praktisi dibidang budidaya perairan.

BIODATA PENULIS



Ridha Hiola, S.Pi., M.Si

Dosen Jurusan Manajemen Sumber Daya Perairan
Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan

Penulis lahir di Gorontalo 12 Februari 1990. Penulis adalah dosen tetap di Jurusan Manajemen Sumber Daya Perairan Fakultas Kelautan dan Teknologi Perikanan, Universitas Negeri Gorontalo. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Jurusan perikanan Universitas Hasanuddin dan melanjutkan S2 pada Jurusan ilmu perikanan Universitas Hasanuddin, Makassar.