

**Karakteristik Molekular dan Morfo-Genetik Populasi Karang
Echinopora lamellosa (Esper, 1795) di Selat Alas, Provinsi
Nusa Tenggara Barat**

*Molecular and Morpho-Genetic Characteristics of Coral
Echinopora lamellosa (Esper, 1795) Population in Alas Strait,
West Nusa Tenggara Province*

**MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI
H052201008**



**PROGRAM STUDI MAGISTER BIOLOGI
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2022

**Karakteristik Molekular dan Morfo-Genetik Populasi Karang
Echinopora lamellosa (Esper, 1795) di Selat Alas, Provinsi
Nusa Tenggara Barat**

Tesis

Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi Biologi

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI
H052201008

kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER BIOLOGI
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

**KARAKTERISTIK MOLEKULAR DAN MORFO-GENETIK POPULASI
KARANG *Echinopora lamellosa* (ESPER, 1795) DI SELAT ALAS,
PROVINSI NUSA TENGGARA BARAT**

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI

Nomor Pokok : H052201008

Telah dipertahankan dihadapan panitia ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi program magister Departemen Biologi Universitas Hasanuddin pada Tanggal 08 Maret 2022 dinyatakan memenuhi syarat kelulusan.

Disetujui Oleh :

Pembimbing Pertama

Pembimbing Kedua

Dr. Rosana Agus M.Si

Dr. Magdalena Litaay, M.Sc

NIP.196509051991032003

NIP.196409291989032002

Ketua Program Studi Biologi

Dekan Fakultas MIPA
Universitas Hasanuddin

Dr. Ir. Slamet Santosa, M.Si

Dr. Eng Amiruddin, M.Si

NIP.1962207261987021001

NIP.1972051519970021002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

NAMA : MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI

NIM : H052201008

PROGRAM STUDI : BIOLOGI

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atas keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 1 Januari 2022

Yang menyatakan



MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas kuasa-Nya senantiasa melimpahkan rahmat, hidayah, taufik dan inayah kepada hamba-Nya yang lemah ini, sehingga selesailah penulisan manuskrip tesis ini dengan dengan judul 'Karakteristik Molekular dan Morfo-Genetik Populasi Karang *Echinopora lamellosa* (Esper, 1795) di Selat Alas, Provinsi Nusa Tenggara Barat' sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan studi Program Magister, Departemen Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin.

Keberhasilan penelitian dan penyusunan manuskrip tesis ini merupakan rezeki dari Allah SWT yang diberikan kepada penulis melalui bentuk dukungan, bimbingan, pemberian dan penyediaan fasilitas dari berbagai pihak. Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua penulis, Ayahanda Heri Sunyoto dan Ibunda Nurul Hidayati, saudariku tercinta Namira Riski Putri Muquita beserta keluarga besar dan yang terkasih Vita Fitrianti, yang tiada henti-hentinya memberikan do'a, semangat, motivasi, dan nasehat-nasehat dengan penuh keikhlasan, kesabaran serta kasih sayang yang tiada tara selama penulis menempuh pendidikan magister di Universitas Hasanuddin

Penulis menyadari sepenuhnya, dalam penyusunan tesis ini tidak terlepas dari hambatan dan tantangan. Namun berkat kerja keras dan motivasi dari pihak-pihak langsung maupun tidak langsung yang

memperlancar jalannya penyusunan tesis ini. Olehnya itu, secara mendalam saya menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada Ibu Dr. Rosana Agus, M.Si selaku pembimbing pertama dan Ibu Magdalena Litaay, M.mar.sci, PhD. selaku pembimbing kedua atas segala bimbingan, arahan dan motivasi yang telah diberikan kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis ini.

Penulis juga mengucapkan banyak terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Amiruddin, M.Sc. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin beserta seluruh jajarannya.
2. Bapak Dr. Slamet Santosa, M.Si. selaku Ketua Prodi Jurusan Biologi Pascasarjana Universitas Hasanuddin, terima kasih atas segala ilmu, arahan serta bimbingan kepada penulis.
3. Ibu Dr. Irma Andriani, M.Si., Ibu Dr. Juhriah, M.Si., dan Bapak Dr. Sulfahri, M.Si. selaku dewan penguji.
4. Seluruh dosen Departemen Biologi yang telah membimbing dan memberikan ilmunya kepada penulis selama perkuliahan, serta staf pegawai Departemen Biologi yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan urusan administrasi.
5. Bapak Zainul Muttaqin dan staf laboratorium Unit Riset Biomedik RSUD Provinsi NTB atas kemudahan perijinan dan bantuannya dalam penggunaan fasilitas laboratorium penelitian.

6. Teman-teman Program Magister Biologi Universitas Hasanuddin angkatan 2020 yang penulis hormati, khususnya Astri Febriana Iffaf dan Lisa Ainayal Fatiha yang telah banyak membantu penulis dalam pengurusan dokumen administrasi penyelesaian tesis.

Semoga kita semua senantiasa diberikan kemudahan dalam urusan kita dan Allah SWT membalas segala amal kebaikan yang telah diberikan kepada penulis sebagai tabungan amal jariyah di akhirat kelak.

Akhir kata, dengan segala kerendahan hati penulis menyadari bahwa hanya kepada Allah SWT tempat menyerahkan segalanya. Penulis memohon kritik dan saran membangun dari semua pihak demi tercapainya peningkatan kualitas karya ilmiah yang lebih baik lagi. Semoga manuskrip tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan semua pihak khususnya untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Makassar, 1 Januari 2022

Penulis

Muhammad Irsyad Abiyusfi Ghafari

ABSTRAK

MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI. *Karakteristik Molekular dan Morfo-Genetik Populasi Karang Echinopora lamellosa (Esper, 1795) di Selat Alas, Provinsi Nusa Tenggara Barat* (dibimbing oleh Rosana Agus dan Magdalena Litaay).

Echinopora lamellosa merupakan jenis karang adaptif yang memiliki bioprospekting sebagai kandidat restorasi terumbu karang di wilayah Selat Alas, Provinsi Nusa Tenggara Barat. Penelitian ini merupakan penelitian awal yang bertujuan untuk (1) menganalisis keanekaragaman genetik, (2) keterkaitan karakteristik genetik dan morfologi intra- dan inter- populasi, dan (3) kekerabatan genetik populasi karang *E. lamellosa* di Selat Alas.

Penelitian ini mengambil sampel karang *E. lamellosa* dari Selat Alas utara dan selatan. Metode pengambilan data meliputi pengamatan dan pengukuran aspek morfologi dan morfometri, serta pengambilan data molekuler melalui teknik PCR-RAPD dan teknik DNA Barcoding. Data morfologi serta data molekuler digunakan untuk mengkonstruksi pohon fenetik NJ, tabel matriks jarak genetik dan aliran genetik, serta analisis AMOVA.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa keanekaragaman genetik populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas tergolong tinggi (88%). Terdapat 2 (dua) populasi karang *E. lamellosa* yang berbeda secara signifikan berdasarkan konsensus pohon fenetik NJ dan hasil AMOVA ($\Phi_{PT}=0.119$, $P<0.05$ dan 0.01), dimana fitur morfologi yang lebih beragam dimiliki oleh populasi di Selat Alas utara yang hidup di tempat keruh. Jarak genetik dan aliran gen antar sub-populasi mengikuti pola jarak habitat. Kekeruhan habitat, arus utama di Selat Alas dan peristiwa pemutihan karang diduga memainkan peranan penting dalam menentukan variasi karakteristik molekuler dan morfologi populasi *E. lamellosa* di Selat Alas.

ABSTRACT

MUHAMMAD IRSYAD ABIYUSFI GHAFARI. *Molecular and Morpho-Genetic Characteristics of Coral Echinopora lamellosa (Esper, 1795) Population in Alas Strait, West Nusa Tenggara Province* (supervised by Rosana Agus and Magdalena Litaay).

Echinopora lamellosa is a species of adaptive scleractinian coral with potentially to become candidate for coral restoration program in Alas strait, Nusa Tenggara Province. This preliminary research is aimed to analyze (1) the genetic diversity, (2) the linkage of genetic and morphological characteristics among intra- and inter- population, and (3) the genetic relationship among coral *E. lamellosa* population in Alas strait.

The research sampling was done by taking *Echinopora lamellosa* tissue from northern and southern Alas strait. Data collection included observation and measurement on morphological features, along with molecular data collection through PCR-RAPD and DNA Barcoding technique. The collected data was then used to construct NJ phenetic tree, gene flow and genetic distance matrix, as well as AMOVA analysis.

The result of this study shows that *Echinopora lamellosa* population in Alas strait hold a high genetic diversity (88%). There are 2 (two) significantly different *E. lamellosa* populations based on NJ phenetic trees consensus and AMOVA results ($\Phi_{PT}=0.119$, $P<0.05$ and 0.01), where more varied morphological features was found in northern population that living in turbid waters. Genetic distance and gene flow between sub-population follow the habitat distant pattern. It is suspected that water turbidity, main oceanic current and possibly previous bleaching event in Alas strait play a significant role in determining the variation of molecular and morphological characteristics of *E. lamellosa* population in Alas strait.

DAFTAR ISI

	halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN KEASLIAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	3
C. Tujuan Penelitian	4
D. Manfaat Penelitian	4
E. Ruang Lingkup Penelitian	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Autekologi dan Sinekologi Karang Keras (Bangsa Scleractinia)	6
B. Karang <i>Echinopora lamellosa</i>	19
C. Selat Alas	22
D. Teknik Molekular pada Studi Genetik Karang	25
E. Kajian Genetika Molekular Karang di Indonesia	28

F. Kerangka Teori	29
G. Kerangka Konseptual	30
H. Definisi Operasional	31
BAB III. METODE PENELITIAN	32
A. Rancangan Penelitian	32
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	33
C. Alat dan Bahan Penelitian	35
D. Wilayah dan Teknik Pengambilan Sampel	36
E. Teknik Pengambilan Data	38
F. Teknik Analisis Data	44
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	48
A. Deskripsi Hasil Penelitian	48
B. Pembahasan	65
BAB V. PENUTUP	78
A. Kesimpulan	78
B. Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	80
LAMPIRAN-LAMPIRAN	101

DAFTAR GAMBAR

nomor		halaman
1.	Anatomi dan morfologi polip karang keras	7
2.	Siklus reproduksi karang keras	13
3.	Tipe-tipe terumbu karang	17
4.	Dokumentasi bentuk koralit dan koloni <i>Echinopora lamellosa</i>	20
5.	Peta distribusi <i>Echinopora lamellosa</i>	21
6.	Posisi Selat Alas	23
7.	Ilustrasi prinsip kerja teknik RAPD	26
8.	Kerangka teori dalam penelitian	30
9.	Kerangka konseptual penelitian	30
10.	Skema penelitian	32
11.	Peta stasiun pengambilan sampel	34
12.	Pohon fenetik NJ berdasarkan data morfologi	51
13.	Variasi morfologi koloni <i>Echinopora lamellosa</i> di SAU dan SAS	52
14.	Pohon fenetik NJ berdasarkan data RAPD	56
15.	Matriks jarak genetik per sampel berdasarkan RAPD	57
16.	Visualisasi aliran gen dan jarak genetik antar sub-populasi	62
17.	Konsensus pohon fenetik NJ	63
18.	Pohon fenetik NJ berdasarkan data sekuens	64
19.	Topologi pohon fenetik NJ berdasarkan data sekuens	64

DAFTAR TABEL

nomor		halaman
1.	Bentuk pertumbuhan karang keras	9
2.	Penanda genetik untuk beberapa taksa organisme	28
3.	Beberapa publikasi terkait genetik karang di Indonesia	29
4.	Detail pelabelan sampel dan target jumlah sampel	38
5.	Kandidat primer pendek untuk PCR-RAPD	42
6.	Detail pasangan primer universal ITS	44
7.	Data parameter lingkungan	49
8.	Nilai monomorfik dan polimorfik amplikon	54
9.	Tingkat keanekaragaman morfologi <i>Echinopora lamellosa</i>	58
10.	Tabel analisis AMOVA terhadap data biner haploid RAPD	59
11.	Matriks nilai PhiPT dan Nm per stasiun (sub-populasi)	61
12.	Matriks jarak genetik (GD_{pop}) antar stasiun (sub-populasi)	61

DAFTAR LAMPIRAN

nomor		halaman
1.	Detail tahapan kegiatan penelitian	102
2.	Tampilan kartu charta warna CoralWatch	103
3.	Kolom hasil pengamatan fitur morfologi	104
4.	Tabulasi karakter berdasarkan data fitur morfologi	105
5.	Hasil tabulasi data biner karakterisasi fitur morfologi	106
6.	Hasil dokumentasi elektroforesis PCR-RAPD	107
7.	Profil sekuens sampel <i>Echinopora lamellosa</i> terpilih	108
8.	Detail BLAST hasil sekuens sampel terpilih	111
9.	Peta prediksi wilayah pemutihan di Selat Alas tahun 2010	117
10.	Peta prediksi wilayah pemutihan di Selat Alas tahun 2016	118
11.	Dokumentasi koloni muda <i>Echinopora lamellosa</i>	119

DAFTAR ISTILAH

Istilah-istilah yang digunakan dalam penelitian ini didefinisikan sebagaimana berikut:

1. ***Echinopora lamellosa*** adalah jenis karang dari suku Merulinidae yang memiliki bentuk hidup (*life-form*) seperti lembaran (*foliaceous*), koralitnya berdinding tipis dan kecil dengan kolumela kecil dan kompak yang umumnya tampak berwarna coklat pucat atau kehijauan.
2. **Fenetik** (*phenetics*) adalah studi terkait hubungan antar kelompok organisme yang didasarkan pada derajat kesamaan (*similarity*) diantara mereka, yang dapat bersumber dari data molekuler, fenotipik, anatomi maupun fisiologi. Hubungan fenetik antar organisme dapat digambarkan/diilustrasikan dalam sebuah pohon kekerabatan yang disebut pohon fenetik atau fenogram (*phenogram*)
3. **Karang** adalah invertebrata laut dari kelas Anthozoa yang umumnya membentuk suatu koloni kompak terdiri atas individu-individu polip yang identik.
4. **Karakterisasi genetik** adalah istilah yang merujuk pada deteksi dan deskripsi variasi sebagai hasil dari perbedaan pada sekuens DNA dan gen tertentu.
5. **Keanekaragaman genetik** adalah bagian dari karakteristik genetik yang merujuk pada total variasi tingkat gen yang teramati dalam suatu populasi.

6. **Kesintasan** adalah kemampuan organisme untuk bertahan hidup dan melakukan pemulihan diri.
7. **Morfo-genetik** adalah istilah yang menjelaskan aspek morfologi dan keterkaitannya dengan aspek genetik suatu populasi
8. **Pemutihan karang (*coral bleaching*)** adalah peristiwa hilangnya pigmen fotosintetik zooxanthella atau keluarnya zooxanthellae dari jaringan karang sehingga karang kekurangan nutrisi, berubah warna menjadi pucat dan dapat berujung pada kematian karang
9. **Plastisitas** adalah kemampuan organisme atau sel untuk mengubah sifat fenotipiknya sebagai suatu respon adaptasi terhadap perubahan di lingkungannya.
10. **Polimorfisme genetik** adalah sifat warisan dalam suatu populasi yang dikontrol oleh lebih dari satu alel pada lokus yang sama.
11. **Populasi** adalah kumpulan individu-individu sejenis (satu spesies) yang hidup dalam suatu wilayah geografis tertentu pada waktu yang sama.
12. **Selat Alas** adalah selat sempit yang menghubungkan antara Pulau Lombok dan Pulau Sumbawa. Selat Alas merupakan selat yang ramai dengan aktivitas pelayaran dan perikanan.
13. **Simbion** adalah organisme yang memiliki asosiasi kuat jangka panjang dengan organisme lain (disebut inang atau *host*) dalam skala waktu evolusi.
14. **Zooxanthellae** adalah kelompok alga dinoflagelata yang hidup bersimbiosis pada jaringan karang dalam jumlah yang melimpah,

memanfaatkan sisa metabolisme karang sebagai bahan baku proses fotosintesis dan menyediakan sumber makanan bagi karang dari hasil proses fotosintesis tersebut.

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Keanekaragaman genetik (*genetic diversity*) karang merupakan unsur intrinsik yang sangat berpengaruh dalam membangun kesintasan hidup karang di alam. Keanekaragaman genetik karang muncul melalui proses evolusi dan menciptakan struktur komunitas karang yang kompleks dengan respon fisiologis yang berbeda-beda terhadap lingkungan (van Oppen *et al*, 2015; Enríquez *et al*, 2017). Studi terkini membuktikan bahwa keanekaragaman genetik karang memainkan peran penting bagi keberlangsungan hidup karang dalam menghadapi ancaman perubahan iklim dan pemutihan massal (Morikawa & Palumbi, 2019; Dishon *et al*, 2020). Sebagai contoh, faktor genetik memungkinkan beberapa jenis karang meningkatkan peluang kesintasan hidup mereka dalam menghadapi peristiwa pemutihan karang (*coral bleaching*) melalui mekanisme simbiosis dengan zooxanthellae dari klad yang toleran terhadap perubahan ekstrem suhu perairan, seperti misalnya zooxanthellae klad D (Thornhill *et al*, 2006). Merujuk pada Buddemeier dan Fautin (1993), karang mampu mengganti tipe simbiotiknya sebagai bentuk respon terhadap cekaman suhu perairan yang ekstrem (*Adaptive Bleaching Hypothesis*),

meskipun mekanisme penggantian simbiosis berdasarkan hipotesis tersebut masih menjadi perdebatan (Hoegh-Guldberg *et al.*, 2002; Goulet, 2006).

Echinopora lamellosa merupakan salah satu jenis karang yang adaptif sehingga dianggap sebagai kandidat yang baik untuk restorasi terumbu karang. Mayoritas anggota genus *Echinopora* memiliki sebaran geografi yang sempit, seperti *E. pacificus* yang menjadi khas di wilayah Indo-Pasifik, serta *E. robusta* yang langka dan ditemukan hanya di wilayah perairan selatan Sri-Lanka (Veron, 2000; Veron, 2002). Berbeda dari anggota genus *Echinopora* yang lain, *E. lamellosa* sangat umum dijumpai dan memiliki sebaran geografis yang luas, meliputi wilayah Samudera Pasifik dan Hindia (Veron, 2000). Hal tersebut mengindikasikan bahwa *E. lamellosa* memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi. Selain itu, *E. lamellosa* memiliki plastisitas reproduksi dan morfologi (Fan & Dai, 1999) serta mampu bersimbiosis dengan lebih dari 1 tipe klad zooxanthellae (Bachtiar *et al.*, 2019), sehingga memberikan suatu keuntungan bagi karang *E. lamellosa* dalam menghadapi perubahan ekstrem di lingkungan. Bachtiar & Hadi (2019) melaporkan bahwa *E. lamellosa* merupakan salah satu dari sedikit jenis karang yang berhasil bertahan hidup paska pemutihan massal di Teluk Sekotong pada tahun 2016. Faktor plastisitas dan variasi genetik sangat mungkin berperan dalam meningkatkan kemampuan adaptasi *E. lamellosa* di alam.

Selat Alas dan sekitarnya merupakan kawasan yang pernah mengalami dampak pemutihan karang di tahun 2010 dan 2016 (Fahlevy, 2017; Wouthuyzen *et al*, 2018), namun mayoritas karang di wilayah tersebut berhasil selamat. Hasil observasi lapangan yang telah dilakukan menemukan fakta bahwa fitur morfologis karang *E. lamellosa* di kawasan tersebut sangat bervariasi, mengindikasikan keanekaragaman genetik yang tinggi. Oleh karena itu, penelitian ini sangat penting sebagai upaya awal untuk memahami lebih jauh tentang keanekaragaman, dinamika populasi karang, dan ketahanan karang terhadap pemutihan di Selat Alas sehingga diharapkan dapat mendukung upaya konservasi, manajemen restorasi terumbu karang, dan perikanan berkelanjutan untuk kawasan tersebut di masa depan.

B. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini:

1. Bagaimanakah keanekaragaman genetik populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas?
2. Bagaimanakah keterkaitan karakteristik genetik dan morfologi intra– dan inter– populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas?
3. Bagaimanakah kekerabatan genetik populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas?

C. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini:

1. Menganalisis keanekaragaman genetik populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas
2. Menganalisis keterkaitan karakteristik genetik dan morfologi intra- dan inter- populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas
3. Menganalisis kekerabatan genetik populasi karang *Echinopora lamellosa* di Selat Alas

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini sebagaimana berikut:

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai rujukan mengenai aspek genetik dan keterkaitannya dengan aspek morfologi karang *Echinopora lamellosa* sehingga mampu menjadi pengisi celah literatur (*literature gap*) dan memberikan kontribusi ilmiah di masa mendatang.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi belajar pada bidang studi zoologi invertebrata, ekologi, biologi laut, genetika, konservasi serta biosistemika dan permodelan.
3. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan bagi pemangku kepentingan/kebijakan (*stakeholder*) dan praktisi konservasi dalam melakukan restorasi terumbu karang.

4. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar ilmiah untuk pengembang dan pemanfaatan kawasan terumbu karang yang berkelanjutan (*sustainable*) di Selat Alas.

E. Ruang Lingkup Penelitian

Lingkup penelitian merupakan batasan masalah yang bertujuan agar penelitian tidak meluas dan menjadi bias. Adapun lingkup penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Lokasi pengambilan sampel adalah kawasan terumbu karang di Selat Alas bagian utara dan selatan yang memiliki karakteristik perairan yang berbeda.
2. Subyek penelitian adalah karang *Echinopora lamellosa* pada kawasan terumbu karang di Selat Alas bagian utara dan selatan.
3. Objek penelitian adalah keanekaragaman genetik karang *Echinopora lamellosa* pada kawasan terumbu karang Selat Alas bagian utara dan selatan.
4. Metode penelitian menggunakan kombinasi metode RAPD dan *DNA Barcoding* serta pengamatan visual pada variasi fitur morfologi karang *Echinopora lamellosa*.

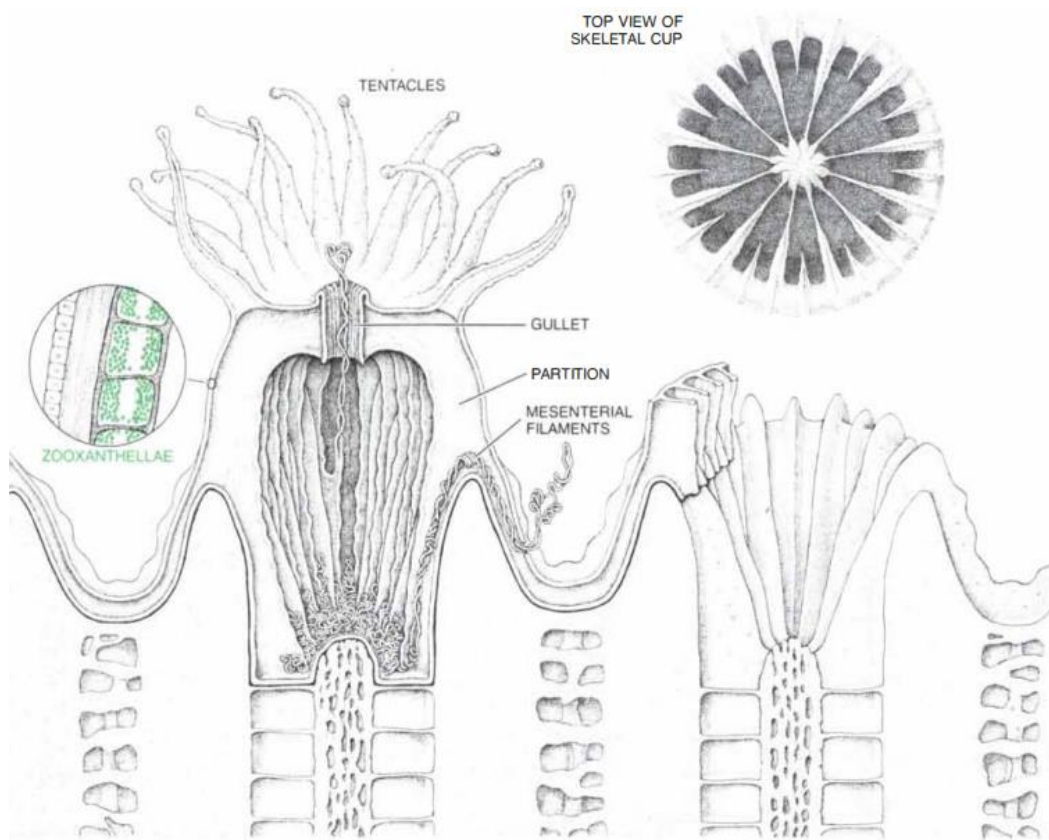
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Autekologi dan Sinekologi Karang Keras (Bangsa Scleractinia)

1. Anatomi dan morfologi karang keras

Karang keras (*hard corals*, bangsa Scleractinia) merupakan invertebrate laut sesil yang memiliki kekerabatan yang sangat dekat dengan anemon (bangsa Actinaria). Secara taksonomi, karang keras tergolong dalam anak kelas Hexacorallia dari kelas Anthozoa, filum Cnidaria, kingdom Animalia (Veron, 2000). Karang keras umumnya hidup berkelompok dan membentuk suatu koloni karang, terkecuali pada beberapa marga karang keras dari suku Fungiidae yang hidup soliter (Hoeksema, 1989). Individu karang keras disebut polip karang yang merupakan individu dipoblastik sederhana dan tampak seperti anemon kecil dengan susunan tentakel membentuk cincin bersimetri 6 melingkari bagian mulut polip (Miller *et al*, 1993; Oliver, 1996). Seluruh individu karang keras dalam koloni terhubung satu sama lain oleh jaringan hidup *coenenchyme* dan kanal-kanal gastrovaskular, sehingga mereka dapat saling melakukan pertukaran nutrisi antar polip (Krueger *et al*, 2018). Ilustrasi anatomi dan morfologi karang keras disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Anatomi dan morfologi polip karang keras (Goreau *et al*, 1979)

Mayoritas karang ordo scleractinia mampu mensekresikan rangka eksternal berbahan kalsium karbonat dan disebut sebagai karang *hermatypic*, sedangkan karang anggota ordo scleractinia yang tidak mampu mensekresikan rangka eksternal berbahan kalsium karbonat disebut *ahermatypic*. Rangka karang berfungsi sebagai sebagai alat perlindungan diri, dimana polip karang akan bersembunyi dalam rangka karang apabila terancam (Chamberlain, 1978; Hoang *et al*, 2015). Rangka karang juga membantu lendir karang (*coral mucus / CM*) dalam menahan polip karang serta keseluruhan koloni karang agar tetap menempel kuat pada substrat pertumbuhannya (Wild *et al*, 2004; Hohn & Reymond, 2019). Selain itu,

rangka karang dilaporkan mampu memantulkan / merefleksikan radiasi sinar UV, sehingga bermanfaat dalam mengurangi tingkat stress karang akibat paparan sinar UV serta menurunkan resiko pemutihan karang (Reef *et al*, 2009; Swain *et al*, 2018). Rangka karang yang disekresi oleh Polip-polip karang dalam suatu koloni besar dapat berfusi dan terdeposit sehingga membentuk suatu struktur besar yang dikenal sebagai 'terumbu karang'. Kemampuan karang keras dalam menciptakan struktur terumbu karang menyebabkan karang keras terkadang disebut sebagai karang hermatipik atau *reef-builder corals* (Marshall, 1996; Wild *et al*, 2004), meskipun tidak semua kelompok karang keras mampu sebenarnya mampu mensekresikan rangka kapur.

Bentuk rangka karang yang bervariasi dan khas menjadi dasar identifikasi karang secara konvensional. Variasi rangka karang disebut sebagai bentuk pertumbuhan karang (*life form*). English *et al* (1997) membagi bentuk pertumbuhan karang keras menjadi 2 kelompok besar, yaitu *Acropora* dan *non-Acropora*. Keberadaan polip aksial (polip yang tumbuh pada ujung cabang) menjadi ciri khas Marga *Acropora* (Veron, 2000; Suharsono, 2008). Bentuk pertumbuhan karang keras kelompok *Acropora* dan *non-Acropora* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Bentuk pertumbuhan karang keras *Acropora* dan *non-Acropora* (English *et al*, 1997)

Kelompok	Tipe Pertumbuhan Karang	Bentuk	Contoh
Acropora	Bercabang (<i>branching</i>)	Seperti cabang/ranting	<i>Acropora palmata</i>
	Meja (<i>tabulate</i>)	Tumbuh mendatar dan ditopang oleh satu tumpuan	<i>A. hyacinthus</i>
	Merayap (<i>encrusting</i>)	Tumbuh mengikuti bentuk substrat	<i>A. palifera</i>
	Submasif (<i>submassive</i>)	Seperti tonjolan tumpul yang tebal	<i>A. palifera</i>
	Berjari (<i>digitate</i>)	Percabangan kerucut dan rapat	<i>A. gemmifera</i>
Non-Acropora	Bercabang (<i>branching</i>)	Seperti cabang/ranting	<i>Seriatopora hystrix</i>
	Padat (<i>massive</i>)	Seperti batuan padat	<i>Favia sp.</i>
	Submasif (<i>submassive</i>)	Seperti tonjolan tumpul yang tebal	<i>Porites lichen</i>
	Kerak (<i>encrusting</i>)	Tumbuh mengikuti bentuk substrat	<i>Echinopora pacificus</i>
	Daun (<i>foliaceous</i>)	Berupa lembaran / helaian	<i>Echinopora lamellosa</i>
	Jamur (<i>mushroom</i>)	Soliter, menyerupai mangkok	<i>Fungia sp.</i>

2. Karang keras dan zooxanthellae

Karang keras bersimbiosis dengan alga simbion, atau biasa disebut sebagai 'zooxanthellae'. Zooxanthellae hidup pada jaringan gastrodermal polip karang dengan kepadatan lebih dari $1,32 \times 10^6$ sel/cm² (Al-Hammady, 2013). Zooxanthellae sebenarnya tergolong ke dalam kelompok dinoflagelata yang memiliki ciri khas bercangkang *gymnodinoid*. Namun, ciri khas tersebut tidak dapat dilihat pada kelompok zooxanthellae yang hidup

bersimbiosis pada jaringan karang, karena zooxanthellae pada tahap ini mengalami fase vegetatif dan bersifat non-motil (Biquand *et al*, 2017). Merujuk pada Jimbo *et al* (2013), karang memproduksi protein Lectin SLL-22 yang diduga mampu berikatan dengan glikoprotein pada permukaan sel zooxanthellae dan menyebabkan zooxanthellae tetap pada fase vegetatif.

Pemenuhan kebutuhan hidup karang sangat bergantung dari suplai produk fotosintesis zooxanthellae pada jaringannya. Zooxanthellae mampu menyuplai sekitar 60% kebutuhan respirasi karbon harian serta lebih dari 90% kebutuhan energi bagi karang sebagai inangnya (Muscatine *et al*, 1981; Fournier, 2013; Wooldridge, 2013). Zooxanthellae memiliki pigmen fotosintetik berupa pigmen β -karoten dan klorofil a dalam jumlah melimpah, selain pigmen lain yang dimiliki zooxanthellae dalam jumlah yang lebih sedikit kecil, seperti pigmen klorofil c_2 , diadinoxanthin, diatoxanthin, dinoxanthin, neo-dinoxanthin, peridinin, dan neo-peridinin (Jeffrey & Haxo, 1968). Melimpahnya pigmen β -karoten menyebabkan zooxanthellae tampak berwarna kuning kecoklatan atau keemasan, sedangkan pigmen lainnya memberikan gradasi warna kuning kehijauan (Hochberg *et al*, 2006). Pigmen fotosintetik zooxanthellae memberikan warna cerah pada jaringan karang (Venn *et al*, 2007). Warna jaringan karang yang cerah menjadi salah-satu indikator karang yang sehat (Douglas, 2003; Siebeck *et al*, 2008).

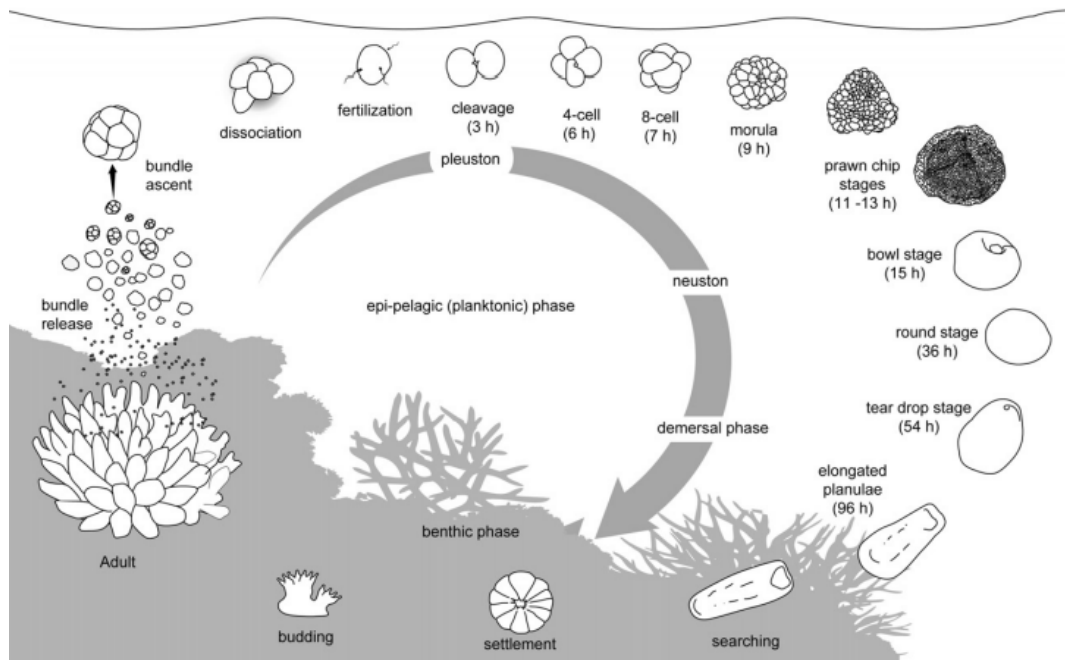
3. Reproduksi karang keras

Karang memiliki tipe reproduksi seksual dan aseksual. Reproduksi seksual dan aseksual memberikan kelebihan dan kekurangan tersendiri bagi karang. Reproduksi aseksual umumnya terjadi ketika koloni telah mampu beradaptasi secara lokal dengan lingkungan (Highsmith, 1982), sedangkan reproduksi seksual secara alami ditujukan untuk menghasilkan koloni dengan genetik yang bervariasi sehingga mudah beradaptasi (Miller & Ayre, 2004).

Reproduksi seksual memungkinkan karang untuk meningkatkan variasi lungkang gen (*gene pool*) pada populasi keturunannya (Combosch & Vollmer, 2013; Zayasu *et al*, 2018). Reproduksi seksual terjadi ketika koloni karang telah memiliki sel reproduksi yang telah matang, disebut sebagai sel gamet. Fertilisasi terjadi apabila sel gamet jantan dan betina berfusi dan membentuk zigot. Secara genetik, fusi gamet jantan dan betina menyebabkan kombinasi sifat genetik yang meningkatkan variasi genetik pada anakan karang (Fuchs *et al*, 2006). Adanya variasi genetik pada populasi anakan karang menjadi ciri khas asal usul anakan karang yang dihasilkan dari reproduksi seksual (Schweinsberg *et al*, 2016). Reproduksi seksual pada karang dapat terjadi secara eksternal dan internal. Reproduksi eksternal maupun internal dapat terjadi pada karang gonokoris (*gonochoris corals*), dimana gamet jantan dan gamet betina dihasilkan dari individu yang berbeda, ataupun pada karang hermafrodit (Richmond & Hunter, 1990).

Mayoritas karang, yaitu sebesar 90.32% dari sekitar 200 species karang yang diketahui mekanisme reproduksinya, melakukan reproduksi seksual secara eksternal (Richmond & Hunter, 1990). Merujuk pada Heemsoth (2014), reproduksi eksternal pada karang terjadi apabila karang mengalami matang gonad dan melepaskan sel gamet jantan dan betina dalam jumlah besar ke kolom air pada suatu waktu, sehingga fertilisasi terjadi di kolom air. Peristiwa pelepasan sel gamet tersebut dikenal dengan istilah pemijahan (*spawning*). Karang yang memiliki kemampuan melepas sel gamet dalam jumlah besar dan pada waktu tertentu disebut dengan istilah *broadcast spawner* atau *mass spawner* (Heemsoth, 2014).

Gamet jantan dan betina akan berfusi dan membentuk zigot yang berkembang menjadi larva planula karang. Planula karang dapat bertahan hidup di kolom air selama sehari-hari hingga menemukan tempat yang cocok untuk menetap dan membentuk koloni karang yang baru, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Kemampuan planula karang bertahan hidup di kolom air dalam jangka waktu tertentu disebut dengan istilah kompetensi larva (*larval competency*) (Wilson & Harrison, 1998). Kompetensi larva planula karang dalam bertahan di kolom air bervariasi pada setiap spesies karang dan membantu dalam persebaran geografis karang ke wilayah perairan yang lebih luas (Harii *et al*, 2002; Whitaker, 2004). Beberapa spesies, seperti *Acropora millepora* dan *Pocillopora damicornis*, diketahui memiliki kompetensi larva yang sangat panjang hingga 100 hari (Richmond, 1987; Connolly & Baird, 2010).



Gambar 2. Siklus reproduktif karang keras (Jones *et al*, 2015)

Reproduksi seksual juga dapat dilakukan oleh karang secara internal. Karang yang melakukan reproduksi seksual secara internal disebut sebagai *brooder*. Fertilisasi secara internal terjadi pada rongga gastrovaskular karang (Heemsoth, 2014). Sehingga, dapat dikatakan bahwa fertilisasi hanya terjadi pada sel gamet antar anggota koloni.

Reproduksi aseksual pada karang disebut pula sebagai reproduksi vegetative karang. Pada dasarnya, polip karang dapat muncul dari koloni karang besar dan menjadi anakan karang yang identik secara genetik dengan induknya (Heemsoth, 2014). Fragmentasi merupakan mekanisme reproduksi aseksual yang paling banyak dimanfaatkan untuk propagasi karang secara buatan (Bowden-Kerby, 2001; Barton *et al*, 2015). Karang dapat terfragmentasi secara alami akibat dari faktor biologi seperti adanya aktivitas *bioeroder* dan predator, atau akibat dari faktor fisik seperti badai

dan gelombang (Highsmith, 1982). Polip karang dapat memproduksi polip baru melalui mekanisme bertunas (*budding*) ataupun membelah (*fission*). Kedua mekanisme tersebut umum terjadi pada karang tunggal suku Fungiidae (Winter & Loya, 1996; Hoeksema, 2004). Adapun *bailout* merupakan peristiwa dimana sebuah polip melepaskan diri dari koloni untuk membentuk koloni baru (Sammarco, 1982). *Bailout* dapat dipicu oleh stress lingkungan, seperti pemutihan karang (*coral bleaching*), perubahan pH dan salinitas perairan secara ekstrem, serta kompetisi ruang dengan makroalga (Sin *et al*, 2012; Kvitt *et al*, 2015; Shapiro *et al*, 2016; Fordyce *et al*, 2017).

4. Karang keras dan terumbu karang

Ekosistem terumbu karang merupakan suatu ekosistem yang terbentuk dan disokong oleh keberadaan karang hermatypic yang merupakan pembentuk utama struktur rangka kapur. Terumbu karang tercipta dari sekresi rangka kapur polip karang (Honh & Reymond, 2019). Pertumbuhan karang sangat lambat dimana beberapa jenis karang hanya tumbuh 3-20 mm setiap tahunnya, sehingga suatu kawasan terumbu karang yang luas dapat berusia ribuan bahkan jutaan tahun (Veron, 2000). Terumbu karang merupakan basis ekosistem terumbu karang. Terumbu karang di suatu wilayah dapat menyediakan perlindungan, makanan, dan oksigen terlarut bagi hewan-hewan air (Maconochie, 2017; Elliff & Kikuchi, 2017). Ekosistem terumbu karang menyokong kehidupan lebih dari 4000 spesies ikan terumbu karang, atau sekitar 25% dari keseluruhan total spesies ikan laut yang tercatat, serta puluhan ribu jenis organisme laut lain

yang berasosiasi dengan karang (Spalding *et al*, 2001). Terumbu karang memberikan wadah terbentuknya habitat berbagai jenis makhluk hidup dan jaring-jaring makanan yang kompleks, sehingga akan tercipta suatu ekosistem yang disebut sebagai ekosistem terumbu karang.

Tidak semua wilayah perairan di muka bumi ini memiliki terumbu karang. Merujuk pada Spalding *et al* (2001), ekosistem terumbu karang hanya membentang sekitar 284.000 km² dari keseluruhan garis pantai dunia, atau kurang dari 1% luas lautan dunia Kawasan Indo-Pasifik memiliki 91% dari keseluruhan total luasan ekosistem terumbu karang dunia. Persebaran terumbu karang terbatas pada pesisir tropis dan subtropis, dimana SPL (Suhu Permukaan Laut) relatif stabil (Price *et al*, 2019). Terumbu karang umumnya ditemukan di perairan dengan kedalaman hingga 20 m, meskipun beberapa spesies ditemukan mampu hidup hingga kedalaman 100 m (Sheppard, 1982; Nozawa *et al*, 2013). Kedalaman tersebut merupakan zona fotik (*photic zone*) yang masih mampu ditembus cahaya matahari serta memiliki suhu perairan yang stabil dan hangat, sehingga memungkinkan polip karang untuk dapat hidup (Hinderstein *et al*, 2010).

Ekosistem terumbu karang merupakan salah satu ekosistem yang paling produktif. Produktivitas oksigen karang berkisar antara 33,1 mmol/m²/hari hingga 46,3 mmol/m²/hari (McGillis *et al*, 2010). Merujuk pada Wilkinson (2004), sekitar 500 juta orang bergantung (baik secara langsung maupun tidak langsung) pada produk ekosistem terumbu karang dalam

memenuhi kebutuhan hidup, baik pangan maupun SDA. Selain itu, diperkirakan sebanyak 30 juta populasi manusia yang hidup dibawah garis kemiskinan bergantung sepenuhnya pada ekosistem terumbu karang untuk memenuhi kebutuhan pangan mereka (Wilkinson, 2004). Ekosistem terumbu karang mampu memproduksi rata-rata biomassa ikan tangkap sebesar 4.7 kg/ha untuk setiap luasan 1 ha terumbu karang (Morais & Bellwood, 2019). Sebagai gambaran, nilai produksi ikan terumbu karang di Kepulauan Solomon dan Vanuatu pada tahun 2007 diperkirakan mencapai US\$ 178,36 juta (Valmonte-Santos *et al*, 2016). Ekosistem terumbu karang juga menghasilkan beragam produk bernilai ekspor, seperti ikan hias dan mutiara yang nilai produksinya terus meningkat setiap tahunnya (Wood, 2001).

Berdasarkan bentuk dan tempat terbentuknya terumbu karang dibedakan menjadi terumbu karang tepi, terumbu karang penghalang, dan atol (Veron, 2000), sebagaimana disajikan pada Gambar 3. Merujuk pada Miththapala (2008), terumbu karang tepi (*fringing reef*) merupakan terumbu karang yang hidup di sepanjang bibir pantai dengan kedalaman tidak lebih dari 40 m, sedangkan terumbu karang penghalang (*barrier reef*) merupakan struktur terumbu yang berada sedikit jauh dan terpisah dari garis pantai, umumnya ditemukan 10-100 km dari tepi pantai. Terumbu karang penghalang berasal dari terumbu karang tepi, kemudian dalam sejarah perkembangannya mengalami pemisahan dari daratan utama disebabkan oleh proses geologi dan meningkatnya permukaan air laut (Kayanne *et al*,

2002). Salah satu contoh terumbu karang penghalang yang sangat terkenal yaitu *The Great Barrier Reef* di pesisir timur Australia yang membentang sepanjang 20.055 km² sejajar dengan garis pantai (Hopley *et al*, 1989). Terkadang, struktur karang yang terpisah-pisah (*patchy reef*) dapat terbentuk antara terumbu karang tepi dengan terumbu karang penghalang. Adapun atoll (*atoll*) merupakan struktur terumbu karang yang tumbuh jauh dari daratan dan umumnya berbentuk melingkar/cincin dan terbentuk akibat proses geologi yang kompleks (Terry & Goff, 2012).



Gambar 3. Tipe-tipe terumbu karang (Spalding *et al*, 2001)

5. Ancaman kepunahan karang keras

Karang merupakan organisme yang sangat rentan terhadap ancaman kepunahan. Beberapa jenis karang memiliki tren penurunan populasi yang disebabkan oleh rendahnya laju pertumbuhan (Goreau & Trench, 2013) dan sebaran geografis yang sempit, seperti *A. suharsonoi* yang telah dimasukkan ke dalam daftar Appendiks II IUCN dengan status terancam (endangered; EN) (Aeby *et al*, 2008). Selain itu peningkatan suhu laut dan pengasaman laut secara global karena perubahan iklim dan pencemaran tentu berdampak pada viabilitas dan resiliensi karang di

seluruh dunia. Peningkatan SPL secara ekstrem hingga 2 sampai 3°C menyebabkan karang mengalami pemutihan (*bleaching*) (Claar *et al*, 2018; Lough *et al*, 2018). Peristiwa pemutihan yang berlangsung berturut-turut dalam rentang masa yang sempit menyebabkan cekaman berkepanjangan bagi karang, sehingga karang tidak mampu untuk melakukan pemulihan (Schoepf *et al*, 2015; Hughes *et al*, 2018). Selain itu, karang yang selamat dari peristiwa pemutihan cenderung rentan mengalami penyakit karang, seperti *black-band disease* dan *white-band disease* (Siringoringo, 2007; Muller *et al*, 2018) serta harus berkompetisi ruang dengan alga dan organisme bentik lainnya (McCook *et al*, 2001; Birrell *et al*, 2008; Bachtiar & Hadi, 2019). Kompetisi ruang antara karang dengan organisme kompetitor dapat mengakibatkan penurunan tutupan karang keras yang berdampak pada terganggunya keseimbangan ekosistem terumbu karang (Tamai & Sakai, 2013; Robinson *et al*, 2019).

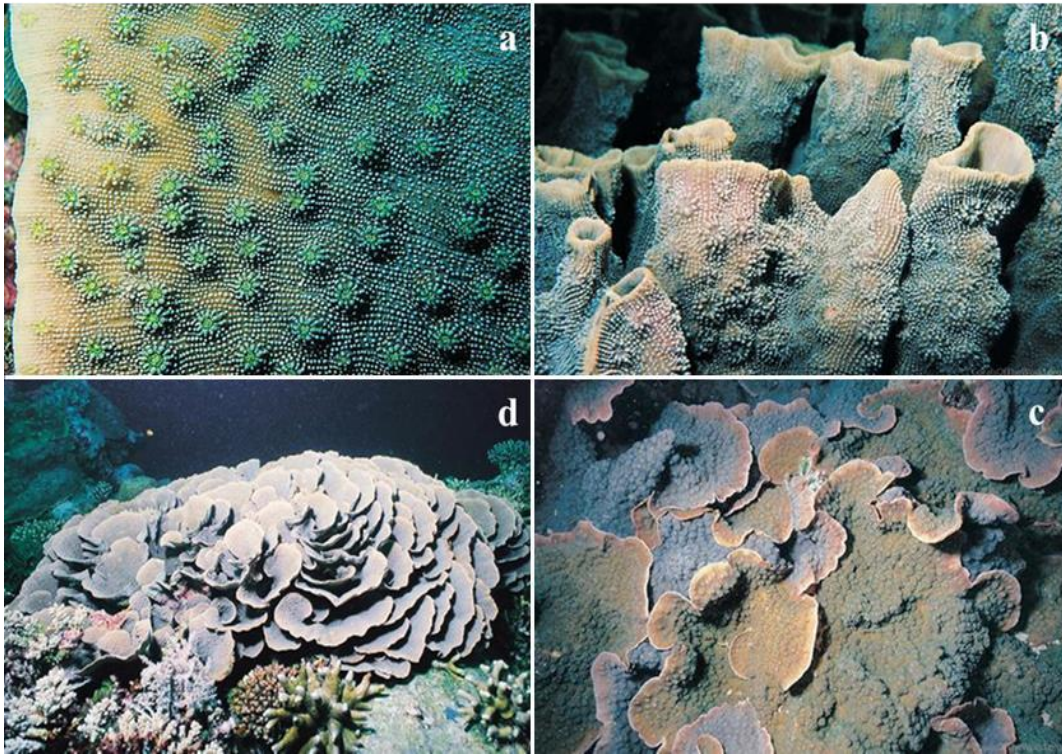
Hambatan pemulihan karang secara massif juga disebabkan oleh faktor antropogenik, dimana pencemaran laut akibat limbah industri seperti tembaga (Cu) dan kobalt (Co) menyebabkan peningkatan pH laut yang berdampak pada penurunan laju kalsifikasi karang hingga 50% (Negri & Hoogenboom, 2011; Maier *et al*, 2012; Biscéré *et al*, 2015), sehingga menghambat pemulihan karang secara massif pasca terjadinya peristiwa pemutihan. Diperkirakan sebanyak 32.8% dari total spesies karang dunia masuk dalam kategori terancam (*threatened*) dan menuju pada kepunahan global (Carpenter *et al*, 2008).

B. Karang *Echinopora lamellosa*

Salah satu jenis karang yang umum dijumpai adalah *Echinopora lamellosa*. *E. lamellosa* merupakan karang yang tergolong sebagai anggota suku Merulinidae (Huang *et al*, 2014). Koloni *E. lamellosa* memiliki bentuk hidup (*life-form*) seperti lembaran tipis (*foliaceous*) membentuk gelungan (*whorl*), tumpukan (*tier*) atau tabung (*tube*) (Gambar 6), meskipun Ghafari (2020) menemukan varian *E. lamellosa* dengan bentuk koloni merayap (*encrusting*) di perairan timur Pulau Lombok. *E. lamellosa* memiliki *calices* kecil berwarna hijau atau kecoklatan dengan diameter 3-6 mm, koralit berdinding tipis dan terpisah, kolumela kecil dan kompak yang tampak berwarna coklat pucat atau kehijauan serta memiliki *paliform lobes* yang berkembang dengan baik. *Echinopora lamellosa* sangat mirip dengan *E. ashmorensis* dan *E. pacificus*, namun bentuk hidup dan ukuran koralit menjadi pembeda antara *E. lamellosa* dengan karang dari marga *Echinopora* lainnya atau marga lain yang mirip, misalnya *Echinophyllia* (Veron, 2000; Kelley, 2016). Dokumentasi berbagai koloni *Echinopora lamellosa* disajikan pada Gambar 4.

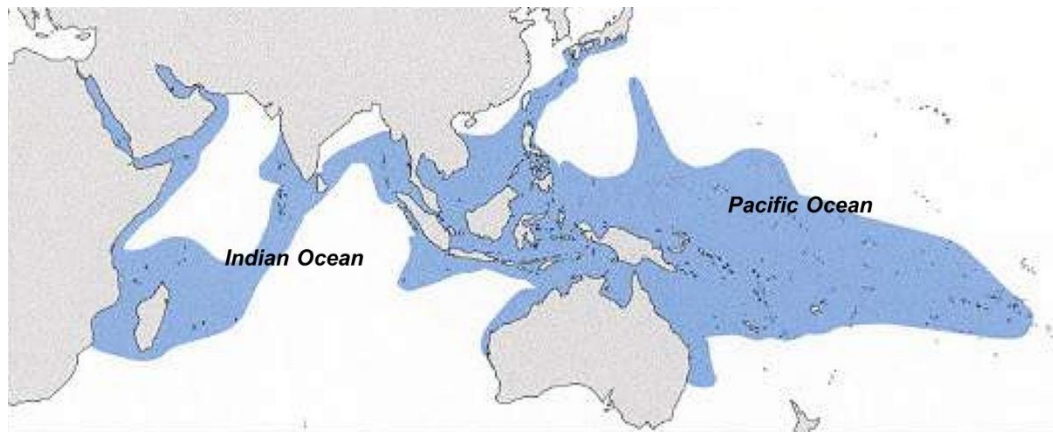
Klasifikasi *Echinopora lamellosa* berdasarkan Hoeksema & Cairns (2020) adalah sebagaimana berikut:

Kerajaan	: Animalia
Filum	: Cnidaria
Kelas	: Hexacorallia
Bangsa	: Scleractinia
Suku	: Merulinidae
Marga	: <i>Echinopora</i>
Jenis	: <i>Echinopora lamellosa</i> (Esper, 1795)



Gambar 4. Dokumentasi *Echinopora lamellosa*: a) penampakan koralit *E. lamellosa*; b) koloni *E. lamellosa* berbentuk tubular; c) koloni *E. lamellosa* berbentuk lembaran; d) koloni *E. lamellosa* di Tanzania (Veron, 2019).

Echinopora lamellosa umum dijumpai di perairan dangkal dan hangat. *E. lamellosa* memiliki distribusi di wilayah perairan hangat di Samudera Hindia dan Pasifik, meliputi Madagakar, Semenanjung Arab, India, Maldive, Indo-Pasifik hingga Australia (Veron, 2000), sebagaimana Gambar 5. *E. lamellosa* hidup di pada kedalaman antara 1-40 m. *E. lamellosa* mampu hidup hingga berumur 10 tahun. Populasi *E. lamellosa* di alam mengalami tren penurunan akibat kerusakan lingkungan perairan dan perubahan iklim yang berujung pada pemutihan karang (DeVantier *et al*, 2014).



Gambar 5. Peta distribusi *Echinopora lamellosa* (Veron, 2000).

Echinopora lamellosa diketahui merupakan karang *hermaphrodite spawner* yang memiliki plastisitas reproduksi (Richmond & Hunter, 1990; Fan & Dai, 1995). Fan & Dai (1999) melaporkan, suhu perairan yang hangat diduga mampu mempercepat pemijahan *E. lamellosa*. Populasi *E. lamellosa* di perairan Taiwan memijah dari Juli hingga Oktober (Fan & Dai, 1995). Musim pemijahan populasi *E. lamellosa* di Taiwan bertepatan dengan peristiwa muson tenggara yang menyebabkan suhu permukaan air laut mulai memhangat menuju akhir Oktober (Aldrian & Susanto, 2003; Belkin & Lee, 2013). Adapun populasi *E. lamellosa* di perairan barat Australia memijah selama pergantian musim semi ke musim panas di akhir bulan November (Babcock et al, 1986).

Echinopora lamellosa memiliki potensi besar dalam mendukung upaya konservasi terumbu karang. *E. lamellosa* dapat dikembangkan untuk perbanyak dan transplantasi terumbu karang melalui metode fragmentasi (Chou et al, 2019), sehingga jenis karang ini memiliki bioprospekting bagi percepatan perbaikan kondisi terumbu karang. Bachtiar *et al* (2019)

melaporkan bahwa *E. lamellosa* mampu bersimbiosis dengan lebih dari satu tipe klad zooxanthellae, sehingga memungkinkan mereka memiliki sifat yang toleran terhadap peristiwa pemutihan. Goulet (2007) menjelaskan bahwa karang yang mampu bersimbiosis dengan banyak tipe klad memiliki potensi lebih besar untuk selamat dari peristiwa pemutihan karang. Hal ini didukung oleh fakta bahwa *E. lamellosa* menjadi salah satu dari hanya beberapa jenis karang yang dapat bertahan dan selamat dari peristiwa pemutihan karang massal tahun 2016 (Bachtiar & Hadi, 2019). Selain itu, plastisitas yang dimiliki *E. lamellosa* (Fan & Dai, 1999) memungkinkan jenis karang ini cepat beradaptasi pada lingkungan.

C. Selat Alas

Selat Alas merupakan perairan sempit yang memisahkan pulau Lombok dengan pulau Sumbawa. Bagian utara selat Alas berbatasan dengan Laut Bali, sedangkan Bagian selatan selat Alas berhadapan langsung dengan Samudera Hindia, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Observasi berdasarkan citra satelit Landsat menunjukkan, jarak pulau Lombok dan Pulau Sumbawa pada bagian Selat Alas tersempit hanya sekitar 7 mil laut, sedangkan pada bagian terlebar dapat berjarak hingga 19 mil laut. Daerah pesisir di Selat Alas memiliki tipe pasang surut campuran, yaitu dimana terjadi dua kali pasang dan dua kali surut dalam sehari dan serta memiliki elevasi muka laut yang berbeda untuk setiap pasang dan surutnya. Sugito (2017) melaporkan bahwa elevasi pasang laut tertinggi di

Selat Alas yaitu sebesar 1,09 m, sedangkan elevasi pasang laut terendah yaitu -1,20 m.



Gambar 6. Posisi Selat Alas

Karakteristik fisika dan kimia Selat Alas dapat ditinjau dari aspek SPL dan salinitas. SPL terendah di Selat Alas dapat mencapai $27,0^{\circ}\text{C}$. SPL terendah mendominasi bagian selatan Selat Alas sepanjang bulan Agustus. Hal ini sebagai dampak rendahnya SPL di Samudera Hindia pada bulan Agustus. SPL akan meningkat pada bulan berikutnya hingga mencapai SPL tertinggi sebesar $29,8^{\circ}\text{C}$ yang mendominasi daerah utara Selat Alas pada bulan November hingga Desember (Santoso, 2019). Adapun tingkat salinitas menurut Junaedi & Paryono (2008) di bagian selatan dan utara

Selat Alas relatif homogen, dimana salinitas rata-rata pada bagian selatan adalah 34,30 psu dan bagian utara sebesar 34,35 psu.

Selat Alas menjadi salah satu jalur perlintasan ITF (Indonesian Throughflow) atau disebut juga sebagai Arlindo (Arus Lintas Indonesia). Arlindo merupakan massa air hangat yang bergerak dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia. Arlindo mengalir melewati beberapa selat di kawasan perairan Indonesia, seperti Selat Lombok dan Selat Ombai, termasuk pula Selat Alas (Metzger *et al*, 2010). Selat Alas cenderung lebih sempit dibandingkan dengan selat lain yang dilalui oleh Arlindo, sehingga kecepatan aliran Arlindo akan meningkat ketika melewati Selat Alas hingga mencapai 2 m/s dengan kecepatan arus rata-rata sebesar 0,2822 m/s dan rerata volume sebesar $20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{S}$ (Metzger *et al*, 2010; Pratama *et al*, 2012; Alkatiri *et al*, 2019). Kecepatan arus dan volume air yang ditranspor oleh Arlindo akan semakin meningkat seiring dengan peristiwa La Nina di Samudera Pasifik (Safitri *et al*, 2012).

Selat Alas merupakan selat sempit yang ramai dengan aktivitas pemanfaatan potensi perikanan. Tidak sedikit masyarakat pesisir di daerah di area ini berprofesi sebagai nelayan, dibuktikan dengan adanya tempat pelelangan ikan (TPI) yang tersebar di beberapa tempat. Menurut Bachtiar (2005), lebih dari 19% populasi penduduk kabupaten yang berhadapan langsung dengan Selat Alas (Kabupaten Lombok Timur dan Sumbawa Barat) hidup sebagai nelayan dan bertempat tinggal di Selat Alas. Selat Alas merupakan salah satu produsen nasional cumi-cumi. Produksi cumi-

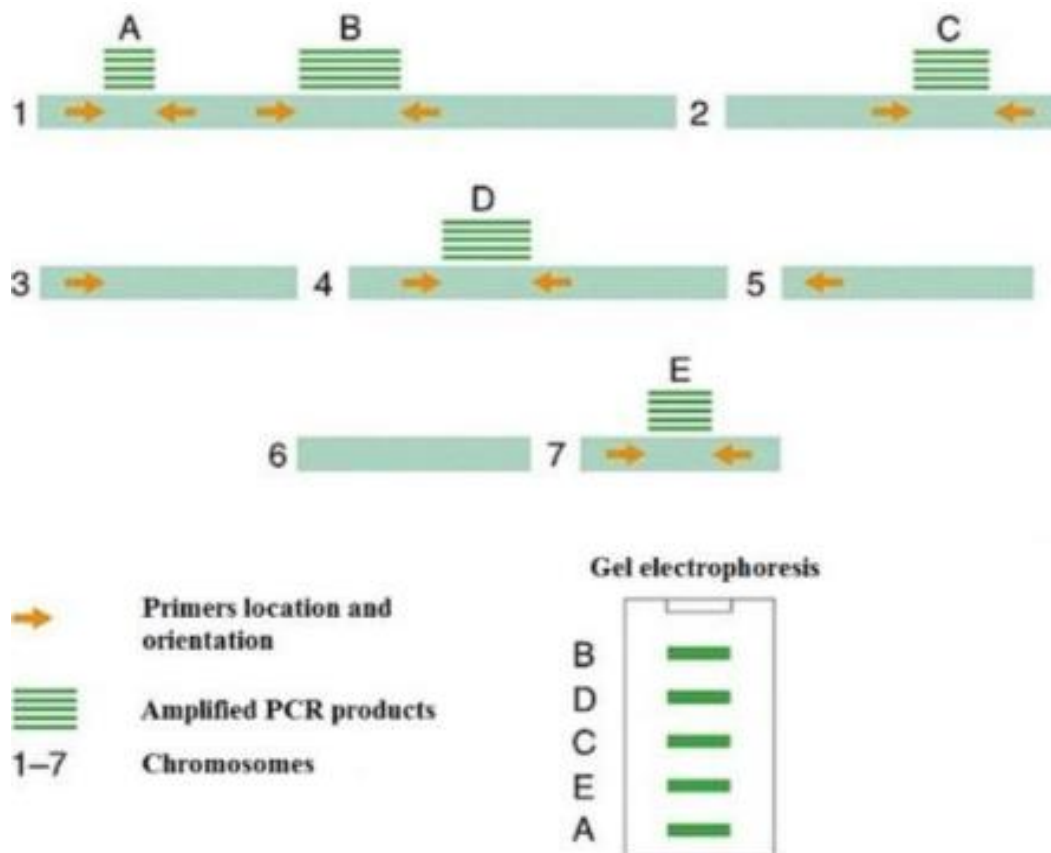
cumi di Selat Alas dapat mencapai 638,40 ton/tahun (Karnan *et al*, 2012), sedangkan potensi lestari ikan kakap merah dan kerapu mencapai 464,9 ton/tahun (Santoso, 2016).

D. Teknik Molekular pada Studi Genetik Karang

Teknik molekular memungkinkan untuk mengetahui berbagai aspek autekologi dan sinekologi karang lebih jauh menggunakan pendekatan genetika. Terdapat banyak teknik molekular yang dapat diterapkan pada studi genetika karang, diantaranya adalah teknik RAPD dan DNA Barcoding. Berikut uraian mengenai kedua teknik tersebut.

1. RAPD

RAPD (*Random Amplified Polymorphic DNA*) merupakan teknik identifikasi variasi genetik berbasis PCR (*Polymerase Chain Reaction*). Teknik RAPD melibatkan penggunaan primer pendek (umumnya primer 10-mer) yang menempel secara random pada posisi tertentu dari untai DNA selama proses PCR dan menghasilkan banyak amplicon DNA (Williams *et al*, 1990; Butler, 2012). Deteksi sekuens polimorfisme nukleotida dengan teknik RAPD berupa visualisasi pola pemitaan amplicon DNA diatas gel elektroforesis, sehingga bentuk polimorfisme yang tampak merupakan situs genetik dominan (sifat dominan) pada untai DNA (Williams *et al*, 1990). Prinsip amplifikasi DNA dengan teknik RAPD sebagaimana disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Ilustrasi prinsip kerja teknik RAPD (Taški-Ajduković & Nagl, 2015)

Teknik RAPD telah diterapkan dalam studi genetika karang. Song & Lee (2000) menerapkan teknik RAPD untuk menentukan hubungan kekerabatan dan biosistematika dari anggota marga *Dendrophyta*. Teknik RAPD juga telah digunakan untuk megungkap variasi genetik intra-populasi pada karang (Kim *et al*, 2004; Maier *et al*, 2011), diferensiasi organisme karang pada tingkat populasi (Romano & Richmond, 2000), serta analisis untuk menentukan penyebaran larva (*larval dispersal*) dan sumber rekrutmen karang (Brazeu *et al*, 2005).

2. DNA Barcoding

DNA barcoding merupakan teknik identifikasi, karakterisasi, deskriminasi ataupun klasifikasi suatu specimen atau organisme berdasarkan bagian spesifik dari untai DNA. DNA barcoding menawarkan suatu inovasi identifikasi organisme atau specimen secara akurat, mudah, cepat dan reliable tanpa terpengaruh oleh adanya sifat plastisitas yang ditunjukkan oleh suatu organisme (Shearer & Coffroth, 2008). Secara prinsip, teknik DNA barcoding melibatkan penanda genetik yang menempel secara spesifik pada suatu daerah khas dan bersifat *conserve* dari urutan untai DNA organisme. Ampilkon bagian spesifik dari DNA spesimen atau organisme kemudian disekuensi dan dicocokkan dengan sekuens yang tersimpan pada *database* (Neigel *et al*, 2007). Setiap taksa organisme memiliki daerah khas pada untai DNA sebagai penanda (*marker*), sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Terdapat berbagai macam penerapan teknik DNA barcoding dalam studi terkait genetika, sistematika dan ekologi karang. DNA barcoding bermanfaat dalam identifikasi juvenile karang dan karang dewasa (Hsu *et al*, 2014; Sadek *et al*, 2018; Morín *et al*, 2019) Selain itu, DNA barcoding telah digunakan untuk mengestimasi kekayaan spesies, sebagaimana McFadden *et al* (2014). Huang *et al* (2011) menggunakan teknik DNA barcoding untuk merekonstruksi kembali kekerabatan antar suku-suku karang yang bermasalah secara taksonomi konvensional. Teknik DNA barcoding juga diterapkan pada usaha konservasi terumbu karang, seperti

identifikasi strain simbion karang yang adaptif terhadap perubahan lingkungan (Cunning & Baker, 2012; Bachtiar *et al*, 2019).

Tabel 2. Penanda genetik yang digunakan untuk beberapa taksa organisme

Penanda (Marker)	Wilayah Target	Taksa Organisme	Referensi
rbcL	Kloroplas	Plantae dan diatom	Singh <i>et al</i> (2012), Pečnikar & Buzan (2013)
matK	Kloroplas	Plantae	Singh <i>et al</i> (2012), Pečnikar & Buzan (2013)
ITS	Nukleus	Plantae, fungi, symbiodiniaceae, scleractinia	Takabayashi <i>et al</i> (1998), Singh <i>et al</i> (2012), Brown <i>et al</i> (2014), Hume <i>et al</i> (2018), Bachtiar <i>et al</i> (2021)
COI	Mitokondria	Animalia, phaeophyceae dan rhodophyta	Rueness (2010), Pečnikar & Buzan (2013), Yang <i>et al</i> (2018)
LSU	Nukleus	Fungi	Brown <i>et al</i> (2014)
SSU	Nukleus	Zygomycota, ascomycota, dan basidiomycota	Tekpinar & Kalmer (2019)
RPB1	Nukleus	Fungi	Pečnikar & Buzan (2013), Tekpinar & Kalmer (2019)
tufA	Kloroplas	Chlorophyta	Vieira <i>et al</i> (2016)

E. Kajian Genetika Molekular Karang di Indonesia

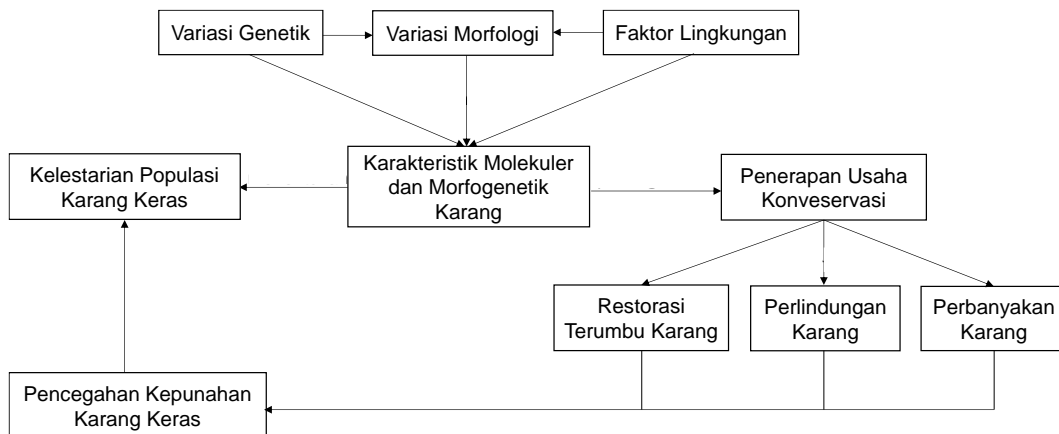
Publikasi ilmiah berkaitan dengan genetika zooxanthellae di Indonesia telah dilakukan pada kelompok karang *Acropora*, *Pocillopora*, *Seriatopora*, *Lobophyllia*, dan *Euphyllia*. Publikasi-publikasi tersebut diantaranya menggunakan analisis penanda universal dengan teknik DNA barcoding dan menggunakan analisis mikrosatelit. Detail publikasi tersebut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Beberapa publikasi terkait genetika karang di Indonesia

No.	Author Publikasi	Jenis Karang	Wilayah/Fragmen yang Dianalisis
1	Wijayanti <i>et al</i> (2004)	<i>Acropora aspera</i>	ITS4
2	Starger <i>et al</i> (2010)	<i>Pocillopora damicornis</i> dan <i>Seriatopora hystrix</i>	Mikrosatelit
3	Starger <i>et al</i> (2015)	<i>Pocillopora damicornis</i> dan <i>Seriatopora hystrix</i>	Mikrosatelit
4	Kusuma <i>et al</i> (2016)	<i>Sarcophyton trocheliophorum</i>	mtDNA ND2
5	Wijayanti <i>et al</i> (2017)	<i>Acropora hyacinthus</i>	mtDNA COI
6	Umar <i>et al</i> (2019)	<i>Lobophyllia corymbosa</i>	mtDNA COI
7	Jompa <i>et al</i> (2020)	<i>Euphyllia glabrescens</i> dan <i>Lobophyllia corymbosa</i>	mtDNA COI
8	Rosser <i>et al</i> (2020)	<i>Acropora tenuis</i>	Mikrosatelit

F. Kerangka Teori

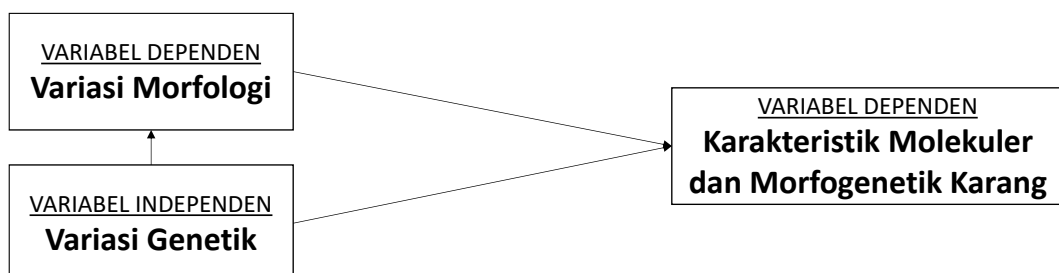
Kerangka teori dimaksudkan untuk memberikan gambaran atau batasan-batasan tentang teori-teori yang dipakai sebagai landasan penelitian yang akan dilakukan. Priyono (2008) menjelaskan bahwa kerangka teori lebih dari sekedar pengumpulan definisi dan informasi dari berbagai literatur, namun lebih kepada upaya penggalian teori yang dapat digunakan peneliti untuk menjelaskan hakikat dari gejala yang diteliti. Adapun kerangka teori dalam penelitian ini sebagaimana disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Kerangka teori dalam penelitian ini

G. Kerangka Konseptual

Kerangka konsep merupakan hubungan atau kaitan antar konsep atau variabel yang akan diamati dan diukur melalui penelitian yang akan dilaksanakan (Priyono, 2008). Variasi genetik dan fitur morfologi karang merupakan dua variabel yang mudah untuk diamati dan diukur serta sangat berpengaruh terhadap karakteristik molekuler dan morfologi karang. Penelitian ini akan menyediakan informasi karakteristik molekuler dan morfologi karang didapatkan melalui analisis terhadap variasi genetik dan variasi fitur morfologi karang *Echinopora lamellosa*. Kerangka konseptual dari penelitian ini sebagaimana disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kerangka konseptual penelitian ini

H. Definisi Operasional

Definisi operasional dalam penelitian ini sebagaimana berikut:

1. Variasi molekuler merupakan keragaman DNA antar individu maupun populasi yang dapat diukur berdasarkan informasi polimorfisme genetik yang bersumber dari pola pita-pita DNA pada gel elektroforesis ataupun urutan (sekuens) basa nukleotida DNA.
2. Variasi genetik merupakan perbedaan yang ditemukan pada suatu gen tertentu pada tingkat populasi yang dapat teramati (fenotipik) ataupun tidak dapat teramati (genotipik), namun bersifat dapat diturunkan/diwariskan (*inheritable*) kepada keturunan (*offspring*).
3. Variasi morfologi merupakan perbedaan sifat terkait kenampakan rupa dan struktur luar (eksternal) maupun dalam (internal) tubuh organisme yang dapat diukur secara kualitatif (pengamatan visual dan tekstur) maupun kuantitatif (pengamatan berdasarkan satuan pengukuran standar).