

PERANAN ZOOXANTHELLA DALAM EKOSISTEM TERUMBU KARANG

oleh

Anugerah Nontji¹⁾**ABSTRACT****THE IMPORTANCE OF ZOOXANTHELLA IN CORAL REEF ECOSYSTEM.**

Zooxanthellae is a vernacular name used for unicellular algae living inside the body of various kinds of marine invertebrates, where their association with the host animal is symbiotic. The zooxanthella obtains shelter, carbon dioxide, and nutrients from the host while the host get organic food and oxygen from the zooxanthella as the product of photosynthesis. It is shown that in a global scale this endosymbiont can produce as much as 4.6×10^8 ton C/year. Significant role of zooxanthella in a coral reef ecosystem is described covering among others : photosynthesis, energy transfer to the host animal, nutrient recycling, production and consumption of oxygen, and calcification of coral skeleton.

PENDAHULUAN

Terumbu karang yang hanya terdapat di daerah tropik merupakan ekosistem bahari yang banyak menarik perhatian antara lain karena : (a) mempunyai produktivitas biologik yang sangat tinggi, (b) sangat kaya akan keragaman jenis, dan (c) mempunyai nilai estetika yang hampir tiada taranya dibandingkan dengan ekosistem lain.

Tingginya produktivitas suatu terumbu karang biasanya sangat menonjol dibandingkan dengan perairan sekitarnya. YONGE (1972) misalnya mengibaratkan atol di tengah samudera bagaikan "oasis" di tengah "gurun" yang gersang dan miskin. Keadaan ini tentulah menunjukkan bahwa terumbu karang memiliki suatu sistem yang sangat efisien dalam pendauran hara dan dalam pengaliran energi di antara komponen-komponen ekosistemnya.

Energi yang "menghidupi" setiap ekosistem alami bersumber dari energi surya. Energi surya ini dapat disadap langsung hanya oleh tumbuhan melalui proses fotosintesis. Tumbuhan sebagai produsen primer

yang terpenting di perairan oseanik adalah fitoplankton, tetapi di perairan terumbu karang yang penting adalah tumbuhan bentik dan simbiotik (SARGENT & AUSTIN 1949; ODUM & ODUM 1955). Tumbuhan simbiotik yang terpenting di terumbu karang adalah alga uniselular yang dikenal sebagai zooxanthella yang hidup di dalam jaringan hewan karang dan invertebrata lainnya. Asosiasi simbitotik antara zooxanthella dengan hewan karang adalah sedemikian eratnya hingga sangat menentukan metabolisme hewan tersebut, kemampuannya untuk membentuk kerangka dan juga sebaran vertikalnya. Terdapatnya zooxanthella dalam berbagai jenis invertebrata di terumbu karang memberi petunjuk bahwa peranan zooxanthella sangat penting untuk dapat memahami fungsi ekosistem terumbu karang secara keseluruhan.

PENGERTIAN UMUM TENTANG ZOOXANTHELLA

Zooxanthella adalah alga uniselular yang hidup di dalam tubuh berbagai invertebrata

1). Pusat Penelitian Ekologi Laut, Lembaga Oseanologi Nasional - LIPI, Jakarta.

bahari dalam hubungan yang saling menguntungkan atau bersifat simbiosis mutualistik. Karena sifat hidupnya yang demikian, zooxanthella disebut pula bersifat endosimbiotik atau endozoik. Zooxanthella mendapat perlindungan, dioksida karbon, dan hara dari hewan inangnya, dan sebaliknya hewannya mendapat zat-zat makanan dan oksigen hasil produksi fotosintesis zooxanthella (FANK—BONER 1971).

Istilah zooxanthella adalah nama umum (vernacular name) yang berasal dari nama marga (genus) *Zooxanthella* yang digunakan oleh Brandt (1881) untuk suatu Dinoflagellata yang hidup simbiotik dalam tubuh radiolaria *Collozum inerme* Haeckel (MUSCATINE 1980). Sekarang istilah zooxanthella digunakan dalam pengertian yang lebih luas yang mencakup tiap alga uniselular yang hidup sebagai simbion dalam invertebrata.

Kebanyakan zooxanthella merupakan anggota dari Dinophyceae. Umumnya Dinophyceae hidup sebagai fitoplankton sedangkan zooxanthella hidup terutama di dalam hewan inangnya dan karenanya zooxanthella disebut pula sebagai plankton yang terjebak (imprisoned plankton) (YONGE 1972).

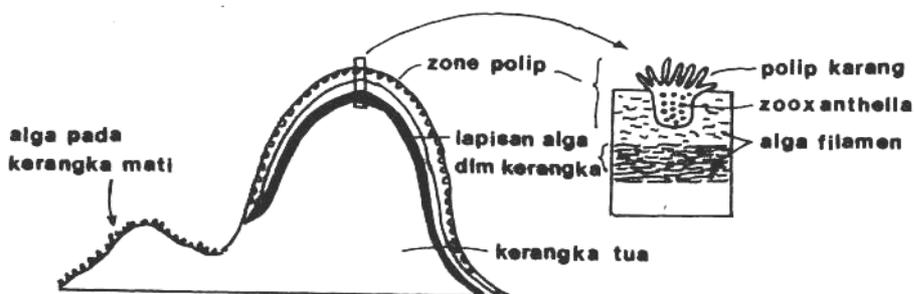
Daur hidup zooxanthella dalam alam menunjukkan adanya fase kokoid dan fase motil (bergerak). Fase kokoid yang bermukim dalam hewan inangnya, mempunyai sel berbentuk agak bulat dan dominan dalam

sejarah hidupnya. Pada fase motil, sel mempunyai sifat dapat bergerak bebas dan hanya terdapat dalam waktu singkat saja. Sel-sel motil mempunyai flagella, dapat berenang yang merupakan suatu cara untuk menyebar dari satu inang ke inang lainnya. Sel-sel kokoid mempunyai ukuran terbesar kurang lebih 10 sampai 14 μm dan mempunyai asosiasi simbiotik yang sudah bersifat turun-temurun (hereditary) dengan jenis-jenis invertebrata tertentu yang tergolong dalam lima filum (Protozoa, Porifera, Coelenterata, Platyhelminthes, dan Mollusca). Sel-sel kokoid ini hidup di dalam sel, di antara sel-sel, di dalam jaringan pengikat atau dalam sinus, tergantung pada jenis hewan inangnya.

Zooxanthella mempunyai jumlah yang berkisar dari kira-kira 10^6 sel per cm^2 karang terumbu (reef coral), atau per mg jaringan anemone laut, sampai 2×10^8 sel per gram jaringan mantel *Tridacna*. Alga ini dapat mencapai 3 % sampai 14 % dari total biomassa protein berbagai asosiasi yang pernah diukur (MUSCATINE 1980).

Pada hewan karang, zooxanthella hidup di dalam lapisan endodermnya. Zooxanthella dalam karang ini adalah Dinoflagellata yang kini ditempatkan di bawah marga *Symbiodinium*.

Kedudukan zooxanthella dalam struktur koloni karang digambarkan secara diagramatik pada Gambar 1. Bentuk terperinci sel zooxanthella semakin banyak diteliti dengan



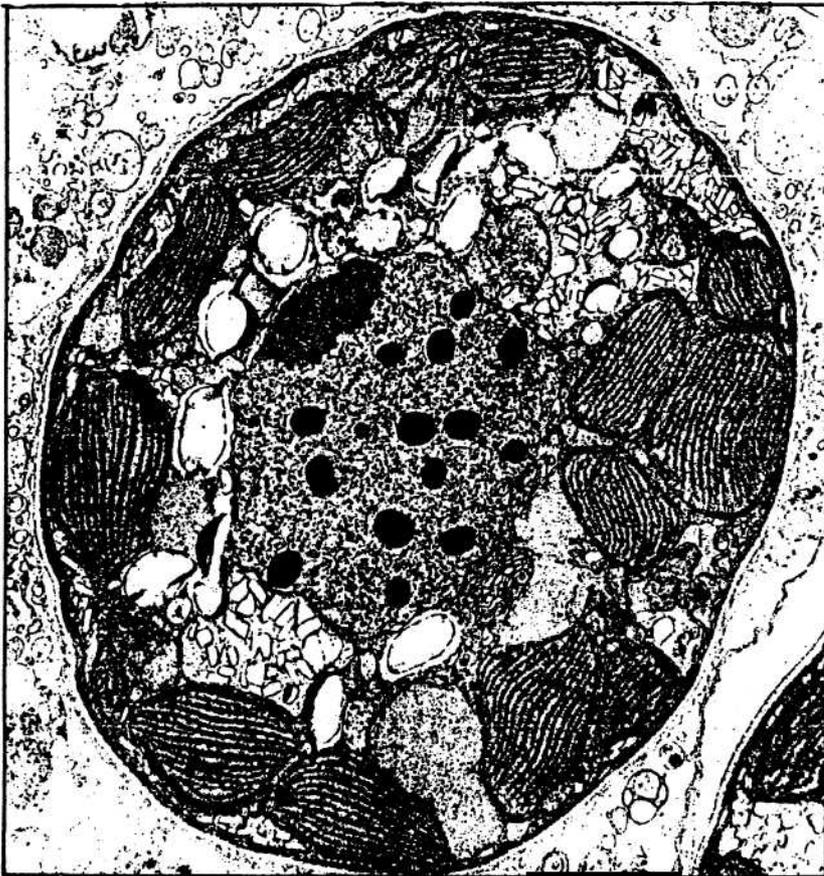
Gambar 1. Penampang melintang sebuah koloni karang menunjukkan hubungan antara polip karang, zooxanthella dan alga filamen (ODUM 1971).

mikroskop elektron. Sebagai contoh dapat dikemukakan hasil yang dikemukakan oleh YENTSCH (1977) seperti tercantum dalam Gambar 2 yang menunjukkan ultrastruktur sel zooxanthella yang terdapat dalam hewan karang.

Zooxanthella dapat dilihat dalam konteks ekologi komunitas sebagai salah satu komponen produsen bentik, atau dalam konteks fisiologi organismik dimana zooxanthella sebagai unsur, produsen dalam asosiasi simbio-

tik antara individu-individu produsen-konsumen.

Penelitian-penelitian mengenai zooxanthella dapat dijalankan dalam keadaan terisolasi dari hewan inangnya (*in-vitro*) atau dalam keadaan asosiasi yang utuh dengan inangnya (*in vivo*). Sifat-sifat atau perilaku zooxanthella sangat ditentukan oleh hewan inangnya, oleh sebab itu hasil penelitian *in vitro* tidak selalu dapat digunakan untuk menerangkan sifatnya yang *in vivo*.



Gambar 2. Ultrastruktur sel zooxanthella yang terdapat dalam hewan karang (YENTSCH 1977).

PRODUKTIVITAS ZOOXANTHELLA

1. Zooxanthella sebagai salah satu komponen produsen pada terumbu karang.

ODUM & ODUM (1955) dalam penelitiannya mengenai struktur trofik di Atol Eniwetok sampai pada suatu kesimpulan bahwa koloni karang ternyata mempunyai komponen tumbuhan yang jauh lebih besar dari pada komponen hewan, masing-masing dengan rata-rata 0,63 g/cm² dan 0,021 g/cm² berat kering atau perbedaan sekitar tiga kali lipat. Komponen tumbuhan disini dapat berupa zooxanthella yang hidup di dalam polip dan "filamentous green algae" yang hidup terbenam di dalam kerangka karang (Gambar 1). Pada mulanya filamentous algae ini diduga bersifat parasitik terhadap karang inangnya, tetapi ODUM & ODUM (1955) menunjukkan bahwa filamentous algae ini juga bersifat simbiotik dengan karang. Jadi suatu koloni karang sebenarnya merupakan suatu kompleks coelenterata-alga yang telah merupakan suatu satuan ekologis yang

sudah sangat terpadu. Biomassa filamentous alga ini sendiri jauh lebih banyak dari zooxanthella, kurang lebih dalam rasio 15 : 1. Perbandingan komponen biomassa dalam karang hidup dicantumkan dengan lebih terperinci pada Tabel 1 yang memperlihatkan bahwa zooxanthella membentuk sebanyak 4,5% dari biomassa total karang.

Sampai berapa jauh peranan filamentous algae ini sebagai simbion karang kemudian sering dipermasalahkan lagi karena terdapatnya kenyataan-kenyataan yang tidak mendukung. KANWISHER & WRIGHT (dalam YONGE 1972) misalnya mengemukakan bahwa kontribusi filamentous algae terhadap produktivitas terumbu karang adalah kecil karena rendahnya laju fotosintetiknya.

Selain algae endozoik yang hidup di dalam hewan, berbagai tumbuhan juga merupakan produsen primer dalam ekosistem karang yang mencakup tumbuhan bentik dan fitoplankton. Kenyataan adanya total biomassa tumbuhan yang besar dan keragamannya yang tinggi inilah yang dapat mene-

Tabel 1. Ringkasan komponen biomassa dalam karang. Nilai dinyatakan dalam g/cm² berat kering dan dalam persen terhadap total biomassa (ODUM & ODUM 1955).

	Jaringan Tumbuhan	Jaringan hewan	Total biomassa
	Dalam polip	0.004 (zooxanthella) 4,5%	0.021 25%
			0.025 30%
Zone polip	Di antara polip	0.022 (alga filamen) 20% 0.022 20%
	Total dalam zone polip	0,026 31%	0,021 25%
			0,047 56%
Total sub-polip	0,037 (alga filamen) 44%	0,037 44%
Total untuk semua lapisan	0,063 75%	0,021 25%	0,084 100%

rangkan mengapa terumbu karang dapat mendukung komunitas yang sangat kaya dalam satuan luas yang terbatas.

2. Produktivitas zooxanthella dalam skala global.

Hasil-hasil pengukuran di lapangan dan di laboratorium, serta dengan berbagai pertimbangan teoretis, telah memungkinkan untuk memperkirakan produktivitas zooxanthella pada tingkat global.

Total wilayah terumbu karang di dunia adalah kurang lebih 6×10^5 km² yang merupakan 0,17 % dari seluruh luas muka bumi, dan 15 % dari total luas dasar laut dangkal dengan kedalaman 0 m - 3 m. Diperkirakan hanya 10% dari luas terumbu karang yang dihuni oleh hewan-hewan karang, berarti meliputi luas sebesar 6×10^4 km². Produktivitas karang adalah sebesar rata-rata 15,5 g C/m²/hari atau 5567 g C/m²/tahun yang berarti untuk seluruh wilayah terumbu karang produktivitasnya berkisar 0,58 sampai $3,4 \times 10^8$ ton C/tahun atau berarti pula 0,25% sampai 1,5% dari produktivitas plankton pada tingkat global (yang sekarang diperkirakan sebesar 23×10^9 ton C/tahun). Data produktivitas karang tersebut diatas merupakan perkiraan rendah (underestimate) untuk produktivitas zooxanthella. Produktivitas netto zooxanthella di dalam foraminifera bentik dapat mencapai 3,9 g C/m²/hari. Jika total produksi zooxanthella dalam organisme ini dan dalam organisme lainnya (sponge, Molluska, dsb.), serta zooxanthella yang hidup dalam anemone-anemone di daerah ugarahi (temperate) ditambahkan dengan zooxanthella yang hidup dalam karang, maka akan diperoleh nilai produktivitas zooxanthella pada tingkat global sebesar $4,6 \times 10^8$ ton C/tahun atau 2% dari total produksi plankton. Adalah suatu hal yang menarik bahwa nilai ini lebih tiga kali lipat dari pada produksi total plankton di daerah-daerah upwelling (MUSCATINE 1980).

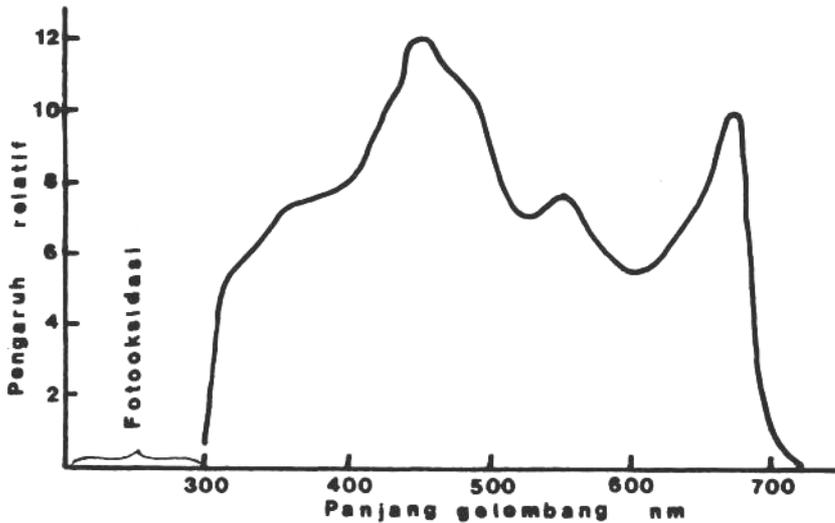
3. Pigmen fotosintetik dan spektrum aksi.

Dalam proses fotosintesis, energi surya disadap oleh pigmen-pigmen fotosintetik, terpenting diantaranya ialah klorofil. Zooxanthella mengandung berbagai pigmen fotosintetik yang antara lain telah dikaji terperinci oleh JEFFREY & HAXO (1968). Zooxanthella dari lima jenis kerang Tridacnidae, delapan jenis karang zoantharia dan alcyonaria, dan satu jenis hydrozoa mengandung pigmen-pigmen yang identik dengan yang ada pada dinoflagellata *Amphidinium* sp, yang meliputi pigmen-pigmen klorofil-a dan -c, beta carotene, peridinin, neoperidinin, dinoxanthin dan beberapa xanthophyll lainnya. Peridinin dan dinoxanthin adalah spesifik terdapat pada dinoflagellata, dimana peridinin berfungsi sebagai "accessory pigment" dalam proses fotosintesis. JEFFREY (1968) berhasil memisahkan dua jenis pigmen klorofil-c, masing-masing klorofil-c₁ dan -c₂. Rasio klorofil-a terhadap -c₂ beragam bergantung zooxanthella dan hewan inangnya.

Sinar surya mempunyai spektrum yang sangat lebar, namun yang dapat diserap untuk fotosintesis hanyalah spektrum yang kurang lebih sama dengan spektrum cahaya tampak, yakni kurang lebih dari panjang gelombang 400 nm sampai 720 nm (disebut pula PAR = photosynthetically active radiation). Gelombang yang lebih panjang dari 600 nm diserap oleh klorofil-a sedangkan yang lebih pendek oleh "accessory pigment".

Kemampuan fotosintesis suatu tumbuhan pada berbagai panjang gelombang akan membentuk suatu gambaran yang dikenal sebagai spektrum aksi (action spectrum).

Spektrum aksi ini akan menunjukkan efisiensi penggunaan cahaya pada berbagai gelombang, dan merupakan suatu sifat penting yang akan menentukan kemampuan adaptasi pada berbagai kondisi cahaya di laut. Salah satu contoh spektrum aksi pada zooxanthella yang diisolasi dari karang masif *Favia pallida* terlihat pada Gambar 3, yang menunjukkan bahwa alga simbiosis tersebut mempunyai respons terhadap ca-



Gambar 3. Spektrum aksi zooxanthella dari karang *Favia pallida* (MUSCATINE 1980).

haya monokromatis dari 300 nm sampai 720 nm, dengan puncak pada 440 nm dan 675 nm. SCOTT & JITTS (1977) menunjukkan pola respons yang serupa untuk spektrum antara 400 nm — 700 nm yang diperolehnya dari pengamatan *in vitro* untuk zooxanthella dari karang *Tridacna maxima*, dan yang dari karang *Pocillopora damicornis* pada penyinaran (irradiations) yang rendah (3×10^8 quanta/m²/sec). Penyinaran tinggi memberikan respons yang lebih merata.

4. Laju fotosintesis dan adaptasi terhadap cahaya.

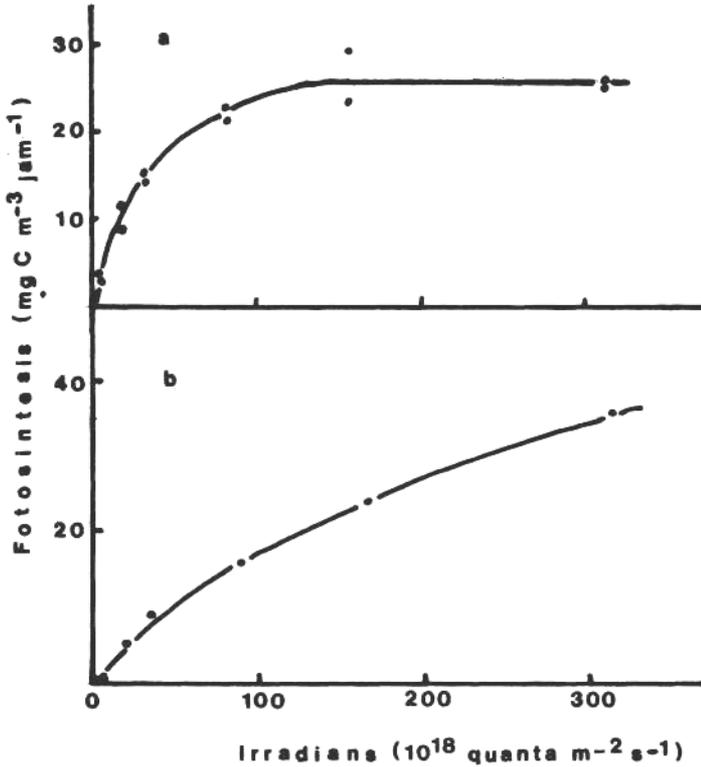
Adaptasi terhadap cahaya dapat dipelajari dari ciri kurva P (laju fotosintesis) versus I (irradiations atau intensitas penyinaran). Sebagai contoh adalah kurva yang dibuat oleh SCOTT & JITTS (1977) untuk zooxanthella dari *Tridacna maxima* dan yang dari *Pocillopora damicornis* seperti terlihat pada Gambar 4.

Kurva P vs I untuk zooxanthella dari *Tridacna maxima* menunjukkan ciri yang lebih bersifat "shade adapted" dibandingkan dengan fitoplankton di perairan yang sama. Yang dimaksud dengan "shade adapted" disini ialah adaptasi terhadap cahaya lemah

dengan ciri fotosintesis maksimum dicapai pada "irradiations" yang relatif rendah atau dengan kata lain cahaya lemah dapat dimanfaatkan dengan efisien. Hal ini sejalan dengan kenyataan bahwa zooxanthella yang hidup dalam jaringan mantel *Tridacna* biasanya mendapatkan "irradiations" yang lemah karena zooxanthella disitu sangat padat hingga menimbulkan efek "self shading".

Kurva P vs I untuk zooxanthella dari karang *Pocillopora damicornis* memberikan gambaran yang sedikit berlainan. Fotosintesis maksimum baru dicapai pada "irradiations" yang lebih tinggi.

SCOTT & JITTS (1977) menunjukkan bahwa meskipun zooxanthella pada karang dan karang adalah sama, namun laju fotosintesisnya berbeda tergantung pada jenis hewan inangnya. Zooxanthella dalam karang yang hidup pada perairan yang dalam atau dengan "irradiations" yang lemah akan menunjukkan efisiensi fotosintesis yang tinggi ("shade adapted"). Sebaliknya yang hidup di permukaan dengan "irradiations" yang kuat efisiensinya rendah ("light adapted") (MUSCATINE 1980).



Gambar 4. Kurva P vs I untuk zooxanthella. (a) dari *Tridacna maxima*, (b) dari *Pocillopora damicornis* (SCOTT & JITTS 1977).

5. Produksi dan Konsumsi Oksigen

Proses fotosintesis akan menimbulkan produksi oksigen sedangkan respirasi akan mengkonsumsi oksigen. Produksi dan konsumsi oksigen oleh zooxanthella dapat dipelajari baik secara *in vivo* maupun *in vitro*. Karena adanya hubungan simbiotik zooxanthella-hewan karang, maka *in vivo* akan memberikan gambaran yang lebih mendekati kenyataan.

Kurva P vs I untuk zooxanthella *in vitro* akan memberikan gambaran teoretis seperti pada fitoplankton (Gambar 5a) dimana P menunjukkan laju fotosintesis yang dapat dinyatakan dengan laju produksi oksigen, sedangkan R adalah respirasi yang menunjukkan laju konsumsi oksigen. Hubungan produksi (gross dan net) dan respirasi pada

zooxanthella dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_z \text{ gross} = P_z \text{ net} + R_z \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{dan } P_z \text{ net} = P_z \text{ gross} - R_z \dots\dots\dots (2)$$

Dari persamaan (2) jelas, bahwa surplus oksigen ($P_z \text{ net}$) hanya akan terjadi jika $P_z \text{ gross} > R_z$, sedangkan titik kompensasi diperoleh jika $P_z \text{ net} = 0$.

Dalam asosiasi simbiotik zooxanthella hewan (*in vivo*) gambarannya agak berbeda karena R disebabkan baik oleh zooxanthella maupun oleh hewan. Dalam konteks ini karang (coral = c) adalah gabungan invertebrata (animal = a) bersama simbiotiknya (zooxantella = z) atau dapat dinyatakan sebagai:

$$c = a + z \dots\dots\dots (3)$$

Dengan demikian maka akan dikenal tiga macam respirasi yakni respirasi oleh karang (R_c), oleh hewan (R_a) dan oleh zooxanthella (R_z), demikian pula terdapat dua titik kompensasi masing-masing titik kompensasi karang dan titik kompensasi zooxanthella (Gambar 5 b). Pengukuran oksigen (dengan titrasi Winkler atau dengan elektrode) hanya akan membaca P_c net, dan bukan P_z net seperti pada pengukuran *in vitro*. Karenanya, produksi net pada zooxanthella selalu "underestimated" sebesar suatu faktor yang merupakan rasio antara R_z dan R_a . Dari Gambar 5 dapat dijelaskan :

$$P_z \text{ gross} = P_c \text{ net} + R_c \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{dimana } R_c = R_a + R_z \dots\dots\dots (5)$$

Nilai P_z lebih sulit diukur secara langsung karena R_a dan R_z harus diperkirakan dari respirasi hewan dan zooxanthella simbiotiknya secara terpisah :

$$P_z \text{ net} = P_c \text{ net} + R_a \dots\dots\dots (6)$$

$$= P_z \text{ gross} - R_z \dots\dots\dots (7)$$

$$= P_c \text{ net} + R_c - R_z \dots\dots\dots (8)$$

Pada umumnya dalam literatur mengenai terumbu karang, yang dimaksud dengan produksi (untuk menyatakan laju fotosintesis) adalah P_c , bukan P_z .

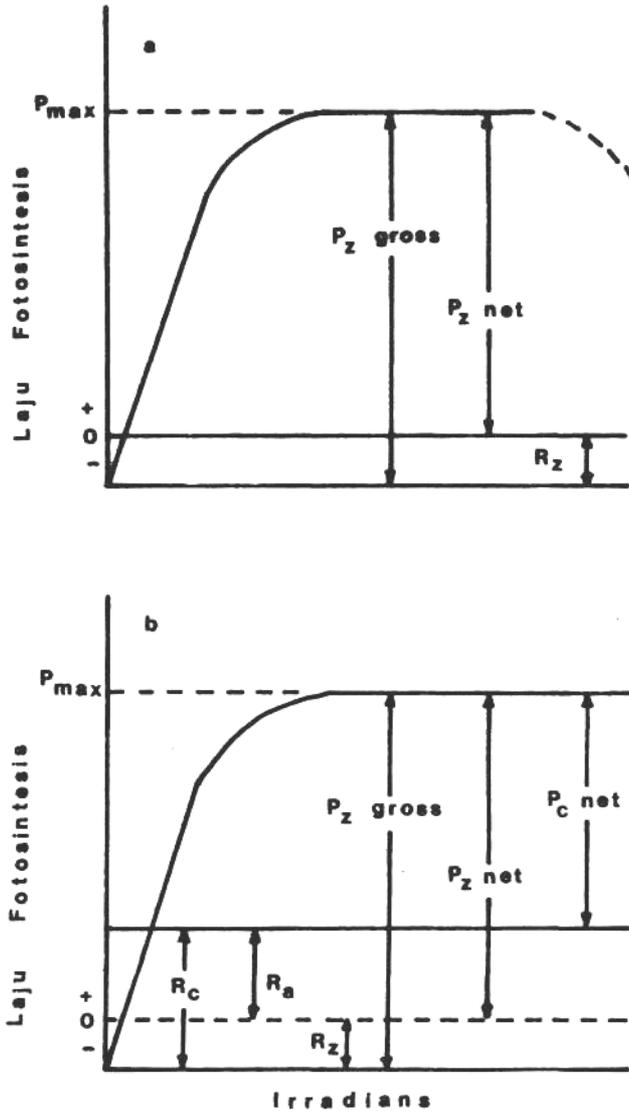
Produksi dan konsumsi oksigen oleh berbagai jenis karang telah menjadi perhatian dalam penelitian-penelitian terumbu karang sejak permulaan abad ini.

Di Indonesia pengkajian mengenai hal ini telah banyak dilakukan dalam tahun-tahun 1928 - 1930 oleh VERWEY (1929, 1931) yang berlokasi di Teluk Jakarta. Sepotong karang dari jenis tertentu dimasukkan ke dalam botol bening dan gelap kemudian di inkubasi di dalam laut selama beberapa waktu. Perubahan kandungan oksigen di dalam botol memberikan gambaran mengenai P dan R. Beberapa contoh hasil pengukuran dengan teknik ini dicantumkan dalam Tabel 2.

Selain zooxanthella, algae filamen dan

berbagai algae bentik merupakan pula produsen oksigen di suatu terumbu karang, sedangkan konsumen oksigen adalah semua organisme yang ada dalam komunitas itu. Produksi dan konsumsi oksigen di suatu terumbu karang mencerminkan metabolisme komunitas di perairan tersebut. Di goba yang agak terlindung dan kaya akan karang, akan ditemukan fluktuasi oksigen yang sangat nyata, oksigen akan mencapai maksimum pada petang hari sedangkan minimum pada dini hari atau pagi hari. VERWEY (1931) misalnya menemukan di Goba Pulau Air (Teluk Jakarta) kandungan oksigen yang maksimum sampai lewat jenuh, sebesar 8,9 ml/l pada petang hari, sedangkan pada pagi hari akan mencapai minimum sebesar 1,6 ml/l. Goba atau paparan terumbu yang lebih terbuka akan mempunyai fluktuasi yang lebih kecil. Padatnya konsentrasi karang dan organisme lainnya di suatu terumbu menyebabkan oksigen dikonsumsi dalam jumlah yang sangat besar selama malam hari hingga minimum ditemukan pada dini hari atau pagi hari. Sebagai ilustrasi VERWEY (1931) menggambarkan sebagai berikut : jika suatu badan air yang agak terbuka terhadap laut memanjang 100 m sepanjang pantai, dengan lebar 10 m serta kedalaman 2 m, maka penurunan oksigen dari 5 menjadi 3 ml/l berarti telah mengkonsumsi oksigen sebanyak lebih dari 4000 l dalam satu malam saja. Tetapi produksi oksigen selama siang hari bisa berkisar 2,5 sampai 5 kali lebih besar dari konsumsi oleh karang dan zooxanthella bersama-sama. Kenyataan ini menunjukkan pentingnya sumbangan produsen primer khususnya zooxanthella dalam memenuhi kebutuhan oksigen karang.

Fluktuasi oksigen disuatu perairan terumbu karang telah digunakan untuk menilai metabolisme komunitas atau produktivitas suatu terumbu karang seperti telah dirintis oleh SARGENT & AUSTIN (1949).



Gambar 5. Kurva P vs I. (a) untuk zooxanthella yang diisolasi. (b) untuk assosiasi zooxanthella hewan karang (MUSCATINE 1981).

Tabel 2. Laju produksi oksigen oleh beberapa jenis karang.

Spesimen	Produksi oksigen	Pustaka
<i>Acropora hebes</i>	0,049-0,069 ml/g/jam	VERWEY, 1931
<i>Pocillopora</i>	0,075 ml/g/jam	SARGENT & AUSTIN, 1954
<i>Acropora</i>	0,118 ml/g/jam	SARGENT & AUSTIN, 1954
<i>Porites</i>	0,042 ml/g/jam	SARGENT & AUSTIN, 1954
12 jenis	1 5 - 1 9 ml/g/24 jam	MUSCATINE, 1980

PERANAN ZOOXANTHELLA DALAM PENGALIRAN ENERGI DAN PENDAURAN HARA

1. Pengaliran energi dari zooxanthella ke hewan inangnya

Pada mulanya diduga bahwa karang dan umumnya Coelenterata bergantung sepenuhnya pada makanan berupa zooplankton. Organ-organnya untuk menangkap makanan (tentakel, cilia, filamen mesenterial yang dapat dikeluarkan) menunjukkan adanya bentuk-bentuk spesialisasi untuk menangkap zooplankton. Namun penelitian-penelitian lapangan menunjukkan bahwa jumlah zooplankton di perairan terumbu dan sekitarnya tidak cukup banyak untuk dapat menunjang kehidupan karang yang padat di suatu terumbu (ODUM & ODUM 1955; TRANTER & GEORGE 1972). Penelitian-penelitian zooxanthella dalam hubungannya dengan berbagai hewan terumbu kemudian menunjukkan bahwa zooxanthella mempunyai peranan penting sebagai sumber energi dan nutrisi bagi hewan karang dan beberapa hewan terumbu lainnya. FRANZISKET (da-

lam JOHANNES *et al.* 1970) misalnya menunjukkan dalam eksperimennya bahwa empat jenis karang yang dipelihara dalam air laut yang bebas zooplankton selama dua bulan, ternyata beratnya bertambah. Kenyataan ini membuktikan pentingnya zooxanthella sebagai sumber energi dan nutrisi bagi hewan karang.

Dari reaksi fotosintesis zooxanthella akan dihasilkan serangkaian senyawa organik yang merupakan energi potensial yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai proses biologis. Dalam asosiasi zooxanthella-karang ternyata bahwa hasil fotosintesis (= fotosintat) zooxanthella dapat ditranslokasikan kepada hewan inangnya. Pengalihan zat-zat organik dari zooxanthella ke hewan inangnya telah didemonstrasikan dengan menggunakan radioisotop atau mikroskop elektron.

Percobaan yang dilakukan oleh MUSCATINE (1967) dengan isotop ^{14}C menunjukkan bahwa zooxanthella yang dikultur dalam air laut, yang terpisah dari hewan inangnya, akan mengikat CO_2 dan akan mengekskresikan hanya sedikit fotosintat radioaktif yang terlarut. Akan tetapi jika

zooxanthella itu dikultur dengan adanya homogenat yang berasal dari hewan inangnya (karang atau *Tridacna*) maka akan diekskresikan 40% dari total CO₂ yang telah terikat, kebanyakan dalam bentuk gliserol, atau bila inkubasi berjangka panjang berupa asam glikolat (glycolic acid). Percobaan ini mempunyai dua arti penting. Pertama, zooxanthella mengekskresikan sejumlah produk fotosintesis yang larut. Hal ini merupakan suatu mekanisme untuk penyediaan langsung energi produk fotosintesis kepada hewan inangnya, bahkan mungkin pula bagi seluruh komunitas terumbu. Kedua, bahwa jaringan hewan inang mengatur aktivitas metabolik spesifik pada zooxanthella simbiotiknya dengan permeabilitas sel alga melalui aktivasi enzim gliserol permease.

Percobaan fotosintesis dengan perunut (tracer) radioaktif menunjukkan bahwa fotosintat radioaktif ditemukan juga di dalam tubuh hewan karang dalam berbagai bentuk senyawaan termasuk lemak, asam amino, asam monokarboksilat, dikarboksilat dan trikarboksilat dengan sejumlah molekul-molekul netral mungkin karbohidrat (YONGE 1972). Bagaimana mekanisme translokasi dari zooxanthella ke dalam tubuh karang, apakah dengan proses difusi aktif, merupakan pertanyaan yang belum dapat dijawab tuntas. MUSCATINE (1980) mengemukakan bahwa translokasi ini merupakan keharusan untuk suatu simbiosis biotrofik.

Ketergantungan karang terhadap zooxanthella diduga akan lebih besar pada terumbu yang terletak di perairan samudera terbuka dari pada yang terletak di perairan pantai yang subur (ODUM 1971).

Sel-sel zooxanthella yang telah tua dan menjelang mati, baik di dalam polip karang maupun dalam kerang *Tridacna*, akan di "telan" dan dicernakan sebagian oleh sel-sel amoebocyte. Pada polip karang, kemudian akan dikeluarkan dari tubuh dalam untaian mucus, sedangkan pada *Tridacna* akan dialihkan ke kelenjar-kelenjar pencernaan dan

selanjutnya dicernakan. Proses ini tampaknya merupakan pengenyahan sel-sel zooxanthella yang sudah kurang atau tidak dapat berfungsi lagi, karena hanya sel-sel yang tua yang menjelang mati dan yang telah kurang nilai nutrisinya yang dikeluarkan (Mc CONNAUGHEY 1978).

2. Peranan zooxanthella dalam pendauran hara

Kenyataan bahwa terumbu-terumbu karang yang subur banyak ditemukan di tengah-tengah samudera yang miskin menunjukkan bahwa terumbu karang mempunyai sistem yang efisien dalam konservasi hara. Salah satu sumber hara terpenting berasal dari zooplankton. JOHANNES *et al.* (1970) mengemukakan bahwa meskipun anatomi polip karang mempunyai bentuk spesialisasi untuk menangkap zooplankton, namun zooplankton lebih banyak berfungsi sebagai sumber zat-zat hara (nutrient) dari pada sebagai sumber energi bagi karang. Selain untuk karang, hara itu dibutuhkan pula oleh zooxanthella. Sekali zooplankton dicernakan oleh polip karang, maka zat-zat hara yang berasal darinya (hara inorganik, vitamin, atau asam-asam amino esensial) akan didaur-ulangkan berkali-kali antara polip dan simbiotiknya dengan efisien.

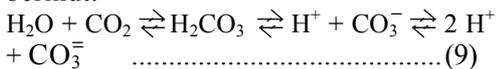
Salah satu hara yang sering mempunyai implikasi terhadap aktivitas biologis ialah P (fosfor). POMEROY & KUENZLER (1969) antara lain telah mempelajari masalah fosfor ini pada karang. Pengkajiannya menunjukkan bahwa lima jenis karang yang dipelajarinya mengelimainasi P dengan laju yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan hewan-hewan lain yang berukuran sama tetapi tanpa zooxanthella. Disamping itu "turn over time" P melalui polip mempunyai jangka waktu panjang (32 hari — 1100 hari). Kenyataan ini menerangkan bahwa P didaur-ulangkan (recycled) antara polip dan zooxanthella dalam koloni yang sama.

PERANAN LAIN ZOOXANTHELLA

1. Zooxanthella dan proses pengapuran

Telah dapat dibuktikan bahwa aktivitas fotosintesis oleh zooxanthella akan dapat memacu pengapuran (calcification) kerangka karang terutama pada ujung-ujung cabang karang yang aktif. Percobaan GOREAU & GOREAU (dalam YONGE 1972) dengan 11 jenis karang menunjukkan bahwa pengapuran karang dalam keadaan disinari akan berjalan dengan laju rata-rata hampir 10 kali lebih besar dari pada karang yang zooxanthellanya telah dikeluarkan.

Bagaimana mekanisme ini terjadi belum dapat diterangkan dengan tuntas. GOREAU (1959) menyebutkan bahwa pengapuran meningkat karena berkurangnya CO₂ oleh fotosintesis dan/atau carbonic anhydrase. Berkurangnya CO₂ akan menaikkan pH hingga bersifat lebih basa dan lebih memungkinkan terjadinya pengendapan kalsium karbonat. Sistem CO₂ dalam laut adalah sebagai berikut:



Dari reaksi kesetimbangan di atas jelas bahwa berkurangnya CO₂ akan menyebabkan reaksi bergeser ke kanan hingga akan lebih banyak tersedia ion-ion karbonat. Dengan adanya ion-ion Ca⁺⁺ maka akan dapat terbentuk CaCO₃ yang mengendap. Kemungkinan lainnya ialah dengan adanya simbiosis maka produk-produk sisa metabolisme hewan dapat secara langsung disingkirkan yang berarti bahwa akan diperoleh energi yang lebih besar untuk transport aktif kalsium dan karbonat melalui jaringan sampai pada kerangka. Skema reaksi pengapuran kerangka karang diperlihatkan dalam Gambar 6.

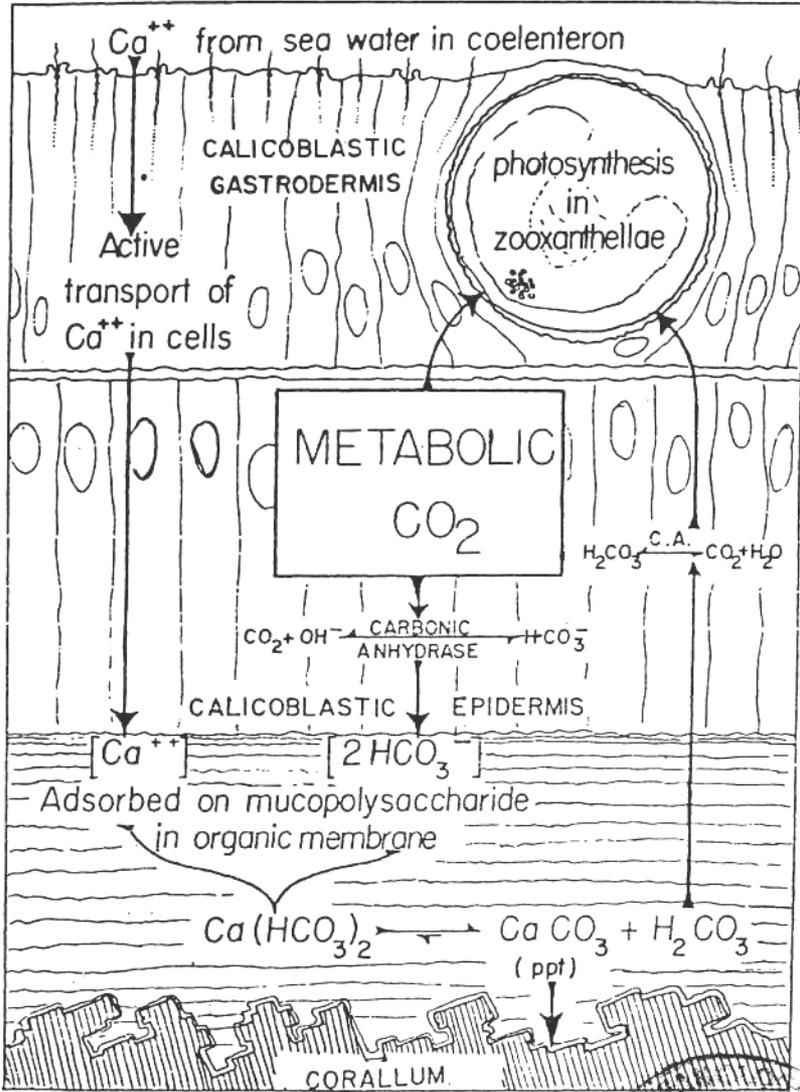
2. Peranan lain

Zooxanthella menghasilkan pula produk yang dapat menentukan pembentukan "byssus" pada kerang *Tridacna*, demikian pula terhadap penampilan kristalin cangkangnya serta struktur-struktur lainnya. Namun me-

kanisme belum jelas benar (McCONNAUGHEY 1978).

DAFTAR PUSTAKA

- FANKBONER, P.V. 1971. Intercellular digestion of symbiotic zooxanthella by host amoebocytes in giant clams (*Bivalvia* : *Tridacnidae*), with a note on the nutritional role of the hypertrophied siphonal epidermis. *Biol. Bull.* 141 : 222 - 234.
- GOREAU, T. F. 1959 The physiology of skeleton formation in corals. I. A method for measuring the rate of calcium deposition by corals under different conditions. *Biol. Bull.* 116: 59-75.
- JEFFREY, S.W. 1968. Two spectrally distinct components in preparations of chlorophyll c. *Nature* 220: 1032 - 1033
- JEFFREY, S.W. dan F.T. HAXO 1968. Photosynthetic pigments of symbiotic dinoflagellates (zooxanthellae) from corals and clams. *Biol. Bull.* 135 : 149-165.
- JOHANNES, R.E., S.L. COLES dan N.T. KUENZEL. 1970. The role of zooplankton in the nutrition of some scleractinian corals. *Limnol. Oceanogr.* 15 : 579 - 586.
- McCONNAUGHEY, B.H. 1978. "Introduction to marine biology" Third edition. The C.V. Mosby Company, Saint Louis : 624 hal.
- MUSCATINE, L. 1967. Glycerol excretion by symbiotic algae from corals and *Tridacna* and its control by the host. *Science* 156: 516-518.
- MUSCATINE, L. 1980. Productivity of zooxanthella. *Dalam*: "Primary productivity in the sea". Ed. : P.G. Falkowski. The Plenum Press, New York: 381 - 402.
- ODUM, E.P. 1971. "Fundamentals of ecology". Third Edition. W.B. Saunders Co., Philadelphia: 574 hal.



Gambar 6. Skema reaksi pengapuran kerangka karang (GOREAU 1959).

- ODUM, H.T. dan E.P. ODUM. 1955. Trophic structure and productivity of a windward coral reef community on Eniwetok Atoll. *Ecol. Monogr.* 25 : 291 -320.
- POMEROY, L.R. dan E.J. KUENZLER. 1969. Phosphorus turn-over by coral reef animals. Proc. 2nd Symposium on radioecology. Eds. : Nelson & Evans. U.S. Atomic Energy Commissions. TID—4500 : 474 - 482.
- SARGENT, M.C. dan T.S. AUSTIN. 1949. Organic productivity of an atoll. *Trans, Am Geophys. Union* 30 (2) : 245 - 249.
- SARGENT, M.C. dan T.S. AUSTIN. 1954. Biologic economy of coral reefs. Bikini and nearby atolls. Part 2. Oceanography (biologic). *Geological Survey Professional Paper* 260-E, F, G : 293 - 300.
- SCOTT, B.D. dan H.R. JITTS. 1977. Photosynthesis of phytoplankton and zooxanthella on a coral reef. *Mar. Biol.* 41 : 307 - 315.
- TRANTER, D.J. dan J. GEORGE. 1972. Zooplankton abundance at Kavaratti and Kalpeni atolls in the Laccadives. "Proceedings of the symposium on corals and coral reefs". Eds. : Mukundan C. & C.S.G. Pillai. *Mar. Biol. Ass. India*, Cochin : 239 - 256.
- VERWEY, J. 1929. Depth of coral reefs and penetration of light. With notes on oxygen consumption of corals. Fourth Pacific Science Congress : 23 hal.
- VERWEY, J. 1931. Coral reef studies; II. The depth of coral reef in relation to their oxygen consumption and the penetration of light in the water. *Treubia* 13 (2): 169-198.
- YENTSCH, C.A. 1977. Plant Life. *Dalam* : "The undersea", Eds. : N.C. Flemming & E. J. Wenk. Macmillan & E. J. Wenk. Macmillan Publ. Co., Inc., New York : 66 - 89.
- YONGE, CM. 1972. Aspects of productivity in reefs. Section I. Productivity of coral reefs. "Proceedings of the symposium on coral and coral reefs". Eds. : Mukundan C. & C.S.G. Pillai. *Mar. Biol. Ass. India*, Cochin : 1 - 12.