

# Valuasi Ekosistem Terumbu Karang di Kawasan Konservasi Pulau Gili Matra menggunakan Analisis Emergy

Hotmariyah<sup>1,3</sup>, Munasik<sup>1\*</sup>, Puji Rahmadi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof Soedarto, SH. Kampus UNDIP Tembalang Semarang 50275 Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Riset Oseanografi, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Jl. Pasir Putih Raya No.1, Ancol, Jakarta Utara. Jakarta 14430 Indonesia

<sup>3</sup>Balai Kawasan Konservasi Perairan Nasional Kupang,

Kementerian Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia

Jl. Yos Sudarso Jurusan Bolok, Alak, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur 85231 Indonesia

Email: munasik@lecturer.undip.ac.id

## Abstract

### Valuation of coral reefs ecosystem in Marine Protected Area of Pulau Gili Matra using Emergy Analyses

The main problem in assessing coral reef ecosystems is selecting the right method to describe their ecological potential. The percentage of live coral cover has so far been used to indicate the condition of coral reefs. This assessment method is easy to apply but has not been able to describe the value of the ecosystem for the benefit of loss or damage to coral reef ecosystems. Further analysis based on energy use for the delivery of ecosystem services is needed, which is called Emergy analysis. This study aims to determine the value of coral reef ecosystems in the Pulau Gili Matra Marine Protected Area, Lombok, West Nusa Tenggara using Emergy analysis. Valuation of ecosystem services in the total emergy calculations is carried out by collecting data on live coral cover, biomass of zooxanthellae, reef fish and megabenthos in different management zones, i.e. core zone, utilization zone and fisheries zone. Meanwhile, energy supplies from outside the system, namely the sun and tides are also included in this total emergy calculation. The results show that the highest total emergy value is found in the core zone,  $1.44E+15$  sej/year while the lowest is in the fisheries zone,  $2.94E+14$  sej/year. Equalizing the value of the coral reef ecosystem with money, using the calculation of the Emergy to Money Ratio (EMR), the EMR value is  $5.75E+07$  sej per Rupiah (Rp). As a result, the value of the coral reef ecosystem is Rp  $7.115.291/m^2/year$  in the core zone and Rp  $4.261.099/m^2/year$  in the fishery zone. The value of a coral reef ecosystem can be determined from the condition of the coral reef which includes variables on live coral cover, biomass of zooxanthellae, reef fish and megabenthos.

**Keywords:** Emergy analyses, value of coral reefs, Conservation Area of Gili Matra Island

## Abstrak

Permasalahan utama dalam penilaian ekosistem terumbu karang adalah memilih metode yang tepat untuk menggambarkan potensi ekologisnya. Persentase tutupan karang hidup sejauh ini digunakan untuk menunjukkan kondisi terumbu karang. Metode penilaian ini mudah untuk diterapkan tetapi belum mampu menggambarkan nilai ekosistem untuk kepentingan kerugian atau kerusakan ekosistem terumbu karang. Diperlukan analisis lanjutan berbasis penggunaan energi untuk menyediakan layanan ekosistem yang disebut analisis Emergy. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai (value) ekosistem terumbu karang di Kawasan Konservasi Pulau Gili Matra, Lombok, Nusa Tenggara Barat menggunakan analisis Emergy. Penilaian layanan ekosistem berupa penghitungan total emergy dilakukan melalui pengumpulan data tutupan karang hidup, biomassa zooxanthella, ikan terumbu karang dan megabentos di zona pengelolaan yang berbeda, yaitu zona inti, pemanfaatan dan perikanan. Sedangkan pasokan energi dari luar sistem, yaitu matahari dan pasang surut juga disertakan dalam perhitungan total emergy ini. Hasil menunjukkan bahwa nilai total emergy di zona inti memiliki nilai tertinggi, sebesar  $1.44E+15$  sej/th sedangkan yang terendah di zona perikanan yaitu  $2.94E+14$  sej/th. Penyetaraan nilai ekosistem terumbu karang dengan nilai uang, menggunakan perhitungan rasio emergy terhadap mata uang (*Emergy to Money Ratio/EMR*), nilai EMR adalah  $5.75E+07$  sej per Rupiah (Rp). Nilai ekosistem terumbu karang sebesar Rp.  $7.115.291/m^2/th$  di zona inti dan sebesar Rp.  $4.261.099/m^2/th$  di zona perikanan. Nilai ekosistem terumbu karang hasil analisis Emergy dapat ditentukan dari kondisi terumbu karang yang meliputi variabel tutupan karang hidup, biomassa zooxanthellae, ikan terumbu karang dan megabentos.

**Kata Kunci:** Analisis Emergy, nilai ekosistem Terumbu Karang, Kawasan Konservasi Pulau Gili Matra

## PENDAHULUAN

Terumbu karang disebut sebagai ekosistem perairan laut tropis yang produktif dan dihuni oleh berbagai jenis biota laut. Selain berfungsi melindungi ekosistem pesisir dari gelombang dan arus laut, ekosistem terumbu karang menjadi tempat memijah, mencari makan dan daerah asuhan bagi ikan ekonomis penting. Akan tetapi ekosistem tersebut sangat rentan terhadap gangguan lingkungan sehingga kondisinya semakin menurun akibat gangguan lokal yang berpadu dengan gangguan global (Burke *et al.*, 2011). Sebagai kawasan segitiga terumbu karang dunia yang memiliki luas seperlima terumbu karang dunia, Indonesia memiliki terumbu karang yang luas, dengan keagaman hayati tertinggi tengah mengalami ancaman kerusakan. Beberapa upaya yang telah dilakukan dengan memperluas kawasan konservasi perairan laut. Kawasan Konservasi Nasional Pulau Gili Matra, Lombok, Nusa Tenggara Barat dengan luas kawasan 2.268,59 ha memiliki ekosistem terumbu karang seluas 247.50 ha (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2022) yang merupakan salah satu target perlindungan laut. Kawasan konservasi perairan telah menerapkan sistem zonasi pengelolaan, yaitu zona inti, zona pemanfaatan dan zona perikanan dengan pemanfaatan utama terumbu karang sebagai objek wisata bahari, daerah penangkapan ikan, serta objek penelitian dan pendidikan. Dampak pemanfaatan ekosistem terumbu karang adalah meningkatnya gangguan lingkungan di kawasan konservasi tersebut, antara lain akibat penangkapan ikan yang merusak, wisata yang tidak bertanggungjawab pembangunan pesisir yang tidak ramah lingkungan serta aktivitas merusak lainnya.

Pemantauan kondisi ekosistem terumbu karang yang bertujuan sebagai dasar kebijakan pengelolaan kawasan konservasi telah dilakukan secara berkala. Beberapa metode penilaian ekosistem terumbu karang telah diterapkan untuk mengetahui kondisi dan kesehatan terumbu karang. Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, penilaian kondisi ekosistem terumbu karang dilakukan oleh penyelam SCUBA antara lain dengan menggunakan metode transek garis, transek sabuk, meliputi perolehan data persentaseutupan substrat dasar, karang hidup hingga data kelimpahan ikan terumbu karang (English *et al.*, 1994). Akhir-akhir ini, metode penilaian ekosistem terumbu karang telah berkembang dengan memanfaatkan teknologi fotografi, yaitu *Underwater Photo Transect* (Giyanto *et al.*, 2017). Tetapi ketersediaan data kondisi terumbu karang belum mampu menjawab kebutuhan informasi untuk pengelolaan kawasan konservasi, seperti penilaian tingkat kerusakan, tindakan perlindungan hingga klaim kerugian akibat kerusakan. Untuk itu dibutuhkan metode analisis untuk menghitung nilai ekosistem terumbu karang sesuai dengan kondisi nyata dan melibatkan seluruh komponen penyusunnya. Metode analisis yang dapat digunakan untuk melakukan valuasi suatu ekosistem antara lain adalah *Emergy* (Paoli *et al.*, 2017; Odum, 1996).

*Emergy* (EmA) adalah metode yang secara kuantitatif mengekspresikan nilai semua produk berdasarkan energi yang setara dengan energi matahari (Odum, 1996). Para praktisi menganggap bahwa *Emergy* adalah metode yang layak dan lebih komprehensif untuk melakukan valuasi ekosistem. Metode analisis *Emergy* menyediakan sebuah valuasi sumberdaya yang obyektif, yakni berdasarkan upaya yang dilakukan oleh alam untuk memasok energi dan aliran material dalam penyediaan jasa/layanan ekologis (Vassallo *et al.*, 2017), yang ditentukan oleh proses produksi, dan bukan oleh preferensi atau kemauan manusia untuk membayar (Odum, 1996). Metode analisis ini dapat mengaitkan biaya dengan sumberdaya yang tidak memiliki nilai pasar dan menempatkannya pada tingkatan barang yang sama dengan nilai ekonomi (Paoli *et al.*, 2017). Keunggulan metode analisis ini adalah kemampuannya dalam standarisasi input dengan satuan ukuran yang berbeda-beda melalui penyamaan satuan (*transformity*) menjadi satu unit *Solar Emergy* (dalam *sejoule* atau *Solar Emergy Joule*, biasanya disingkat *sej*). Sehingga hasil penilaian ekosistem terumbu karang yang merupakan jumlah total sumberdaya sebagai input dari berbagai komponen yang dibutuhkan oleh sistem dapat diperhitungkan dan dianalisis dengan mudah. Akan tetapi sampai saat ini penerapan metode analisis *Emergy* untuk valuasi ekosistem terumbu karang sangat kurang, studi kasus di Indonesia baru sebatas di Karimunjawa (Munasik *et al.*, 2019). Diperlukan kajian-kajian serupa di lokasi lainnya di Indonesia, untuk

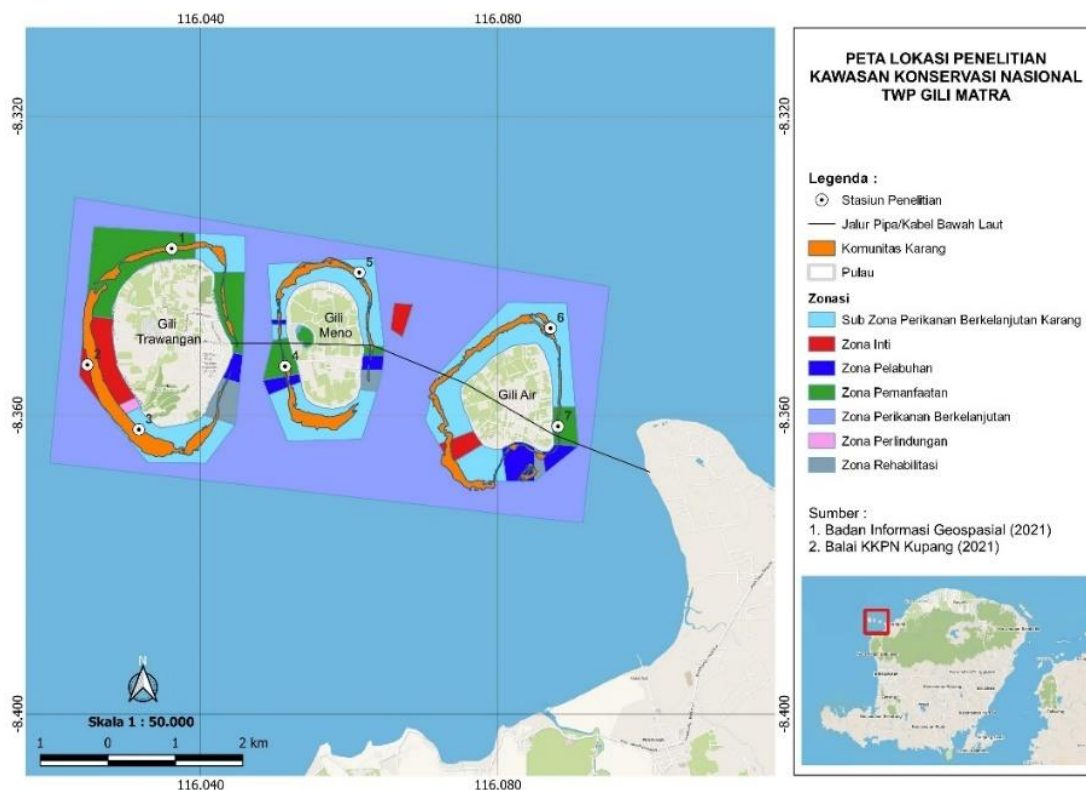
memberikan kepastian harga dalam penanganan kasus klaim kerusakan terumbu karang khususnya dan membantu efektivitas pengelolaan kawasan konservasi perairan Indonesia.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai (*value*) ekosistem terumbu karang sebagai modal alam yang menyediakan fungsi/layanan ekologis pada zona pengelolaan yang berbeda, yaitu di zona inti, pemanfaatan dan perikanan di KKN Pulau Gili Matra dengan menggunakan analisis Energy.

## MATERI DAN METODE

Penelitian dilaksanakan di Kawasan Konservasi Nasional Pulau Gili Matra, Desa Gili Indah, Kabupaten Lombok Utara, Provinsi Nusa Tenggara Barat, Indonesia pada bulan Maret-April 2022. Transek penilaian kondisi ekosistem terumbu karang di zona inti (P. Gili Trawangan), zona pemanfaatan (P. Gili Trawangan, Gili Meno dan Gili Air) dan subzona perikanan berkelanjutan karang "zona perikanan" (P. Gili Trawangan, Gili Meno dan Gili Air; Gambar 1).

Valuasi ekosistem terumbu karang dengan analisis Energy (Paoli *et al.*, 2017; Vassallo *et al.*, 2017; Odum, 1996) melalui tiga tahapan prosedur analisis. Tahap pertama membatasi sistem, mengidentifikasi komponen variabel dan proses-proses yang terjadi di dalam sistem yang akan dinilai dengan membuat model/diagram sistem energi. Pada tahap ini pengukuran variabel dilakukan melalui pengumpulan data terkait komponen yang telah diidentifikasi. Kedua, mengevaluasi Energy seluruh komponen ekosistem menggunakan tabel evaluasi Energy, dan Ketiga, penghitungan nilai ekosistem terumbu karang (dalam satuan mata uang) dengan cara konversi moneter nilai Energy seluruh komponen ekosistem. Pemilihan komponen intrinsik sebagai variabel yang menjadi penyusun ekosistem mengikuti Munasik *et al.* (2019), yaitu karang keras hidup, zooxanthellae, ikan terumbu karang dan megabentos.



**Gambar 1.** Peta lokasi penelitian di Kawasan Konservasi Nasional Pulau Gili Matra

Ekosistem terumbu karang yang dikaji adalah rata-rata terumbu karang (*reef flat*) pada kedalaman 4-10 meter, dengan komponen yang dibatasi pada komponen intrinsik ekosistem terumbu karang dan dikelompokkan menjadi 2 komponen yakni *input* dan *storage* (Tabel 1).

Data tutupan karang hidup diperoleh dengan menggunakan metode UPT (*Underwater Photo Transect*) dengan panjang garis transek 50 m. Persentase tutupan karang keras hidup dan karang mati dianalisis dengan mengolah 50 foto *frame* per stasiun pengamatan dengan bantuan piranti lunak CPCe versi 4.1 (Giyanto *et al.*, 2017). Densitas sel *Zooxanthellae* diambil dari sampel *fragmen* karang yang dominan pada setiap stasiun pengambilan data. Jenis karang yang dominan tersebut ditentukan berdasarkan referensi atau studi literatur. Pemisahan sel *zooxanthellae* dari inang karang mengacu pada (Pillay *et al.*, 2005), dengan teknik *jet of high-pressure air*, dalam penelitian ini menggunakan seperangkat alat *pen air brush* yang dihubungkan dengan kompresor, dilengkapi wadah air (volume 5 ml) yang diisi dengan air laut-formalin 10% sebagai pengawet sel *zooxanthellae*. Diameter sel dikarakterisasi dan difoto pada iluminasi area terang pada perbesaran 400X-1000X menggunakan mikroskop. Diameter sel rata-rata didasarkan pada pengukuran *Symbiodinium* ( $n > 50$  sel) pada setiap sampel *fragmen* karang (LaJeunesse *et al.* (2012) dalam LaJeunesse *et al.* (2018)). Luas permukaan karang diukur dengan cara mengolah foto *fragmen* menggunakan piranti lunak ImageJ. Biomassa *zooxanthellae* dalam penelitian ini adalah total berat karbon individu *zooxanthellae* dalam luas area tertentu ( $mg.C/m^2$ ). Rata-rata berat karbon setiap individu ( $mg.C/ind$ ) diestimasi dengan mengkonversi volume sel menjadi berat karbon dengan metode yang mengacu pada (Cushing, 1958). Selanjutnya Biomassa dihitung dengan mengalikan densitas *zooxanthellae* ( $ind/m^2$ ) dengan rata-rata berat karbon setiap individu tersebut.

Data ikan terumbu karang diperoleh dengan menggunakan metode *Underwater Visual Census* (English *et al.*, 1994) dengan panjang garis transek 70 m dan lebar 2,5 m ke kiri dan ke kanan. Berat setiap individu ikan diestimasi menggunakan metode *length-weight relationship*, dengan mengambil nilai tengah dari interval data panjang total/cagak ikan (cm). Kemudian panjang ikan dikonversi menjadi berat (gr) menggunakan konstanta spesifik masing-masing spesies ikan yang mengacu pada Fishbase (Froese, R. and D. Pauly, 2022). Sedangkan biomassa ikan (dalam  $gr/m^2$ ) dihitung dengan membagi total berat ikan (gr) dengan luas area pengambilan data ( $m^2$ ).

Pengumpulan data megabentos dilakukan dengan menggunakan metode *belt transect* (Munro, 2013), dengan panjang garis transek 70 m dan lebar 1 m ke kiri dan ke kanan. Berat diestimasi dengan metode *length-weight relationship*, menggunakan konstanta spesifik takson berdasarkan (Durden *et al.*, 2016). Pada jenis megabentos yang tidak tersedia nilai konstanta (a dan b), penghitungan estimasi berat dilakukan dengan *generalised volumetric method* yang mengacu pada (Benoist *et al.*, 2019). Perhitungan biomassa megabentos (dalam  $gr/m^2$ ) menggunakan metode yang sama dengan penghitungan biomassa ikan terumbu karang.

**Tabel 1.** Komponen Diagram Sistem Energi pada Ekosistem Terumbu Karang yang akan dinilai

Komponen	Deskripsi	Indikator pengukuran
Input	Komponen yang dibutuhkan karang untuk hidup, yang berasal dari 2 sumber daya terbarukan dari luar sistem yakni Matahari dan Pasang surut, serta 3 sumber daya terbarukan di dalam sistem antara lain <i>zooxanthellae</i> , megabentos, dan ikan karang	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Matahari: Insolasi Matahari (<math>kkal/m^2/hari</math>)</li> <li>- Pasang surut: Jumlah pasang surut air laut (kali/thn) dan rata-rata tinggi elevasi (m)</li> <li>- <i>Zooxanthellae</i>: Biomassa (<math>mg.C/m^2</math>)</li> <li>- Megabentos dan ikan terumbu karang: Biomassa (<math>gr/m^2</math>)</li> </ul>
Storage	Karang keras hidup ( <i>Scleractinia</i> )	Persentase tutupan karang keras hidup (%)

Data insolasi matahari diperoleh dari instansi BMKG-Stasiun Klimatologi Kelas 1 Lombok Barat. Sedangkan data pasang surut diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) melalui laman: <https://tides.big.go.id/pasut/index.html>. Luas ekosistem terumbu karang di Kawasan konservasi tersebut diperoleh dari Kantor Badan Informasi Geospasial (BIG).

Komponen penyusun ekosistem terdiri dari Matahari, pasang surut, *zooxanthellae*, megabentos, ikan terumbu karang dan karang keras hidup. Energi pada setiap *item* (kecuali karang keras hidup) dihitung dengan mengkonversi data masing-masing *item* menjadi energi. Energi dihitung berdasarkan luas tutupan karang keras hidup (HCL) di lokasi penelitian dan dalam kurun waktu satu tahun (Tabel 2).

Sedangkan karang keras hidup (dalam luas tutupan HCL) dihitung berdasarkan luas area pengamatan terumbu karang (12.76 m<sup>2</sup>), yang dihitung dari luas total 50 *frame* (ukuran 58 × 44 cm) metode *underwater photo transect* dengan formula:

$$\text{Luas HCL (m}^2\text{)} = \% \text{ Cover} \times A$$

Keterangan: Luas HCL = Luas tutupan karang keras hidup di lokasi penelitian (m<sup>2</sup>); % Cover = Persentase tutupan karang keras hidup di lokasi penelitian (%); A = Luas area pengamatan terumbu karang (12.76 m<sup>2</sup>),

Evaluasi Energy ekosistem terumbu karang menggunakan tabel evaluasi Energy, yang berfungsi untuk memfasilitasi perhitungan Energy dari komponen-komponen yang berkontribusi dalam ekosistem terumbu karang. Data setiap komponen ditabulasi ke dalam tabel tersebut. Nilai

**Tabel 2.** Metode perhitungan energi komponen input

Komponen Input	Formula
Energi Matahari (j/thn)	Rata-rata insolasi (kkal m <sup>2</sup> /hari) × (1-albedo) × 4,186 j/kkal × Jumlah hari dalam 1 tahun (365 hari) × luas HCL di lokasi penelitian (m <sup>2</sup> ) Dimana: Nilai Albedo = 0.27 (Berrios <i>et al.</i> , 2017)
Energi Pasang Surut (j/thn)	(Tinggi elevasi (m)) <sup>2</sup> × Densitas air laut (kg/m <sup>3</sup> ) × 0.5 × Jumlah pasang surut dalam 1 tahun (kali/th) × Grafitasi × luas HCL di lokasi penelitian (m <sup>2</sup> ) Dimana: 0.5 × Tinggi elevasi = Pusat grafitasi; Densitas air laut = 1.025x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> (Odum, 1996); Grafitasi = 9.8 m/det <sup>2</sup> (Odum, 1996)
Energi <i>Zooxanthellae</i> (j/thn)	Biomassa <i>zooxanthellae</i> (mg.C/m <sup>2</sup> ) × Rasio P/B × Nilai kalori <i>zooxanthellae</i> (kkal/mg.C) × 4,186 j/kkal × luas HCL di lokasi penelitian (m <sup>2</sup> ) Dimana: Rasio P/B = 3.20 (Alino <i>et al.</i> , 1993) dalam (Christensen dan Pauly, 1993); Nilai kalori <i>zooxanthellae</i> = 0.0114 kkal/mg.C (Platt dan Irwin, 1973)
Energi Megabentos (j/thn)	Biomassa megabentos spesies ke-1,...n (gr/m <sup>2</sup> ) × Rasio P/B spesies ke-1,...n (gr/gr/thn) × 0.2 × 5 kkal/gr × 4,186 j/kkal × luas HCL di lokasi penelitian (m <sup>2</sup> ) Dimana: Rasio P/B 2.80 (Moluska); 7.51 (bulu babi); 4.45 (teripang); dan 3; × 0.2 × 5 kkal/gr × 4,186 j/kkal = Konversi berat basah ke energi (Berrios <i>et al.</i> , 2018)
Energi Ikan Terumbu Karang (j/thn)	Biomassa ikan terumbu karang spesies ke-1,...n (gr/m <sup>2</sup> ) × Rasio P/B spesies ke-1,...n (gr/gr/thn) × 0.2 × 5 kkal/gr × 4,186 j/kkal × luas HCL di lokasi penelitian (m <sup>2</sup> ) Dimana: Rasio P/B = 3 (ikan herbivora lainnya: Acanthuridae); 6.18 (ikan omnivore lainnya : Balistidae, Monacanthidae, Tetraodontidae & Chaetodontidae); 2.73 (ikan planktivora lainnya : Labridae); 1 (ikan piscivor lainnya : Lethrinidae, Lutjanidae); 5.60 (ikan kakak tua : Scaridae); 0.80 (ikan kerapu : Serranidae); 6.50 ( <i>Siganus spinus</i> : Siganidae) Alino <i>et al.</i> , 1993 dalam (Christensen dan D. Pauly, 1993)

**Tabel 3.** Transformity setiap variabel komponen Input

Item Komponen Input	Transformity (sej/j)	Sumber Referensi
Matahari	1.00E+00	Odum (1996)
Pasang surut	7.39E+04	Brandt-Williams dan Brown (2011)
Zooxanthellae	4.90E+05	Campbell (2004)
Megabentos	4.46E+06	Macclanahan (1990)
Ikan karang	5.84E+08	Macclanahan (1990)

Solar Energy setiap komponen dihitung dengan mengalikan nilai data dengan transformity masing-masing komponen. Transformity komponen input menggunakan nilai Transformity dari berbagai sumber pustaka (Tabel 3). Sedangkan Transformity karang keras hidup dihitung dengan membagi total Energy komponen input yang memasok energi kepada storage (karang keras hidup) di lokasi penelitian. Energy karang keras hidup dihitung dengan mengalikan data (m<sup>2</sup>) dengan nilai transformity karang keras hidup yang telah dihitung sebelumnya.

Nilai ekosistem terumbu karang dihitung sebagai total Energy seluruh komponen di dalam ekosistem (Energy input + Energy storage). Nilai tersebut dapat dikonversi dalam bentuk nilai uang dengan menggunakan rasio Energy terhadap uang “Energy to Money Ratio (EMR)”. EMR dihitung sebagai rasio aliran energi di suatu negara terhadap Produk Domestik Brutonya, yang dinyatakan dalam mata uang (Euro) per *sejoule* Energy atau (sej/€) (Odum, 1996). Dalam analisis nilai ekosistem ini digunakan rasio Energy sebesar 9.60E+11 sej/€ (Pereira *et al.*, 2013 dalam Paoli *et al.*, 2017). Setelah dikonversi menjadi mata uang Rupiah, dengan acuan 1 Euro = Rp.16,690.41 (Google finance yang diakses pada tanggal 31 Desember 2022), sehingga nilai EMR pada ekosistem terumbu karang adalah 5.75E+07 sej/Rp.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Ekosistem terumbu karang yang dinilai dibatasi hanya pada rata-rata terumbu karang (*reef flat*) pada kedalaman 4-10 meter. Penilaian komponen menggunakan penilaian rinci dalam satu titik pengamatan sebagai perwakilan nilai ekosistem terumbu karang di zona/lokasi yang dikaji. Pemilihan komponen intrinsik ekosistem terumbu karang dalam penelitian ini mengacu pada Munasik *et al.* (2019), berasal dari luar dan dalam ekosistem. Energi Matahari dan pasang surut air laut merupakan komponen dari luar ekosistem yang dibutuhkan bagi kehidupan karang. Energi Matahari merupakan sumber energi utama yang masuk ke dalam ekosistem terumbu karang, dan dimanfaatkan organisme autotrof untuk melakukan proses fotosintesis, dalam penelitian ini adalah *zooxanthellae* (*alga symbiont*). Produk hasil fotosintesis berupa karbon organik dan nutrisi ditransfer kepada karang (inang) untuk pertumbuhan jaringan dan proses kalsifikasi (Lajeunesse, 2020); (Sawall dan Al-Sofyani, 2015). *Zooxanthellae* merupakan simbiosis karang, dimana karang bergantung pada nutrisi dari aktivitas fotosintesis *zooxanthellae*. Sekitar 20 hingga 50 senyawa organik seperti glukosa, asam amino, dan senyawa lainnya yang dihasilkan kemudian dikirim ke inang (hewan karang) sebagai bahan bakar untuk proses metabolisme seperti pertumbuhan jaringan dan membangun kalsium karbonat (Lajeunesse, 2020).

Karang juga bergantung pada energi kinetik dari arus pasang surut air laut sebagai penggerak makanan, nutrisi (De Froye *et al.*, 2022) dan oksigen yang dibutuhkan hewan karang untuk kelangsungan hidupnya, selain itu membantu proses reproduksi, dispersal dan proses *settlement* larva karang.

Ikan terumbu karang dan megabentos merupakan organisme pemanfaat fungsi-fungsi ekologi ekosistem terumbu karang dan menjadi indikator kesehatan terumbu karang (Dewiyanti *et al.*, 2021; Muller-Parker *et al.*, 2015; Paoli *et al.*, 2018; Russ *et al.*, 2021). Ketiganya sebagai

penyeimbang proses-proses yang terjadi di dalam ekosistem, seperti rantai makanan, jaring-jaring makanan, dan proses ekologi lainnya. Kelimpahan megabenthos berkorelasi positif dengan persentase tutupan karang hidup (Dewiyanti *et al.*, 2021), begitu pula ikan terumbu karang. Sebaliknya, luas tutupan terumbu karang juga berpengaruh pada biomassa ikan karang, terutama kelompok trofik ikan coralivora, planktivora, piscivora dan predator besar generalis (Russ *et al.*, 2021), juga biomassa megabentos. Karang keras hidup (Scleractinia) merupakan *storage* atau penyimpan stok Energy pada ekosistem terumbu karang dalam penelitian ini. Nilai ekosistem bergantung pada luas tutupan karang keras hidup sebagai Energy *eksisting* saat penilaian dan Energy komponen penyusun ekosistem lainnya.

Energy seluruh komponen penyusun ekosistem terumbu karang dihitung menggunakan tabel evaluasi Energy (Tabel 4). Nilai Total Energy sumberdaya sebagai input dihitung berdasarkan luas pengamatan karang menggunakan metode *underwater photo transect* (12.76 m<sup>2</sup>). Nilai Energy tertinggi berada di zona inti yakni sebesar 1.44E+15 sej/th, sedangkan yang terendah berada di zona perikanan dengan total 2.94E+14 sej/th. Input yang tinggi mengindikasikan besarnya Energy sumberdaya yang berkontribusi di dalam ekosistem terumbu karang. Energy sumberdaya yang besar merefleksikan tingginya biomassa *zooxanthellae*, ikan terumbu karang dan megabentos yang berasosiasi pada ekosistem terumbu karang.

Kemudian, Energy karang keras hidup di zona inti adalah 2.05E+14 sej/m<sup>2</sup>, sedangkan zona pemanfaatan dan zona perikanan memiliki nilai Energy yang sama yakni sebesar 1.23E+14 sej/m<sup>2</sup> (Tabel 5). Tingginya nilai Energy karang keras hidup berarti nilai Energy Matahari, pasang surut, *zooxanthellae*, ikan terumbu karang dan megabentos tinggi. Selain itu, memiliki luas tutupan karang keras hidup yang juga tinggi. Ekosistem terumbu karang di zona inti memiliki Energy sumberdaya dan luas tutupan karang keras hidup yang lebih tinggi dibandingkan zona lainnya. Sebaliknya Energy sumberdaya dan luas tutupan karang keras hidup di zona perikanan paling rendah diantara zona lainnya. Keduanya menentukan kuantitas Energy karang keras hidup. Rata-rata persentase tutupan karang keras hidup di zona inti, zona pemanfaatan dan zona perikanan berturut-turut adalah 55.02 %, 26.03 % dan 18.83 %. Pada kondisi tersebut, Nilai karang keras hidup di zona inti, zona pemanfaatan dan zona perikanan berturut-turut adalah senilai Rp. 3,558,763/m<sup>2</sup>/th, Rp. 2,141,867/m<sup>2</sup>/th dan Rp. 2,131,218/m<sup>2</sup>/th.

Nilai ekosistem terumbu karang dalam penelitian ini dihitung berdasarkan nilai Energy seluruh komponen penyusun ekosistem. Komponen dibatasi hanya dari Energy Matahari, pasang surut, *zooxanthellae*, ikan terumbu karang, megabentos dan karang keras hidup. Nilai total Energy komponen penyusun ekosistem tersebut kemudian dikonversi menggunakan rasio energy terhadap mata uang (Rp.). Hasil menunjukkan bahwa nilai ekosistem terumbu karang di zona inti lebih tinggi dibandingkan zona lainnya yakni sebesar Rp 7.115.291/m<sup>2</sup>/th. Kemudian nilai terendah adalah ekosistem terumbu karang di zona perikanan, Rp 4.261.099/m<sup>2</sup>/th (Tabel 4). Nilai ekosistem terumbu karang di Kawasan Konservasi Pulau Gili Matra lebih rendah daripada nilai ekosistem terumbu karang di Karimunjawa (Munasik *et al.*, 2019). Tinggi rendahnya nilai ekosistem terumbu karang dalam penelitian ini bergantung pada nilai Energy komponen penyusun ekosistem (yakni Energy Matahari, pasang surut, *zooxanthellae*, megabentos, ikan terumbu karang dan karang keras hidup). Semakin tinggi nilai Energy seluruh komponen maka nilai ekosistem terumbu karang akan semakin tinggi (mahal).

Tingginya nilai Energy tersebut mengindikasikan besarnya energi yang berkontribusi (sebagai input) dan disimpan (*storage*) pada ekosistem terumbu karang. Setiap kerusakan ekosistem terumbu karang maka energi dan stok alam yang hilang akan lebih besar, dan tidak dapat menyediakan fungsi/layanan ekologis bagi organisme laut. Sebagai Kawasan Konservasi Pulau Gili Matra memiliki ekosistem terumbu karang seluas 22.28 ha di zona inti, 25.18 di zona pemanfaatan dan 107.37 di zona perikanan (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2022) memerlukan harga ekosistem terumbu karang ini. Terdapat 72 genera karang (Wildlife Conservation Society, 2019) yang didominasi oleh Montipora dan Porites (Tarigan *et al.*, 2016). Memiliki 567 spesies ikan terumbu karang dari 53 famili (Wildlife Conservation Society, 2019), antara lain Scaridae, Labridae,

*Pomacenridae, Chaetodontidae, Acanthuridae, Pomacanthidae, Apogonidae, Mullidae, Lutjanidae, Ephinephelidae, Balistidae, Nemipteridae, Holocentridae, Siganidae*, dengan rata-rata kelimpahan ikan terumbu karang sebesar 12.747 ind/ha dan biomassa 442,05 kg/ha. Selain itu, terdapat 14 jenis megabentos yang terdata pada penelitian ini, dengan rata-rata kelimpahan 1745 ind/ha dan biomassa sebesar 160.26 kg/ha. Sehingga nilai/harga ekosistem terumbu karang dapat menggambarkan besarnya potensi sumberdaya ekosistem terumbu karang di suatu perairan.

Perekonomian manusia dibatasi oleh ketersediaan stok modal alam dan aliran jasa lingkungan (Paoli *et al.*, 2017). Ketika ekosistem terumbu karang rusak/berkurang maka fungsi/layanan ekologis juga terganggu yang mengakibatkan pengguna layanan ekologis (*zooxanthellae*, ikan terumbu karang dan megabentos) juga berkurang, dan selanjutnya berdampak terhadap perekonomian dan kesejahteraan manusia yang memanfaatkannya. Zona inti memiliki nilai Emergy sumberdaya (sebagai input) dan karang keras hidup (sebagai *storage*) yang lebih tinggi dibandingkan zona lainnya, oleh karena itu nilai ekosistem terumbu karang di zona tersebut lebih tinggi dibandingkan zona lainnya.

**Tabel 4.** Hasil Analisis Emergy Ekosistem Terumbu Karang di Kawasan Konservasi Gili Matra

No.	Item	Unit	Data (unit/th)	Transformity (sej/unit)	Referensi	Solar Emergy (sej/th)	Em Value (Rp/th)
A	EMR IND (2013)	(sej/Rp)				5.75E+07	
B	Nilai Sumberdaya Pada Zona inti						
1	Matahari	j	1.86E+10	1.00E+00	( b )	1.86E+10	Rp 324.18
2	Pasang surut	j	5.68E+07	7.39E+04	( c )	4.19E+12	Rp 72,956.23
3	<i>Zooxanthellae</i>	j	1.17E+02	4.90E+05	( d )	5.75E+07	Rp 1.00
4	Megabentos	j	5.88E+02	4.46E+06	( d )	2.62E+09	Rp 45.59
5	Ikan karang	j	2.45E+06	5.84E+08	( e )	1.43E+15	Rp 24,912,260.99
	Karang keras hidup (HCL)	m <sup>2</sup>	7.02E+00	2.05E+14	( f )	1.44E+15	Rp 24,985,587.99
C	Nilai Sumberdaya Pada Zona Pemanfaatan						
1	Matahari	j	8.82E+09	1.00E+00	( b )	8.82E+09	Rp 153.36
2	Pasang surut	j	2.69E+07	7.39E+04	( c )	1.98E+12	Rp 34,514.25
3	<i>Zooxanthellae</i>	j	5.65E+01	4.90E+05	( d )	2.77E+07	Rp 0.48
4	Megabentos	j	2.53E+05	4.46E+06	( d )	1.13E+12	Rp 19,599.66
5	Ikan karang	j	6.95E+05	5.84E+08	( e )	4.06E+14	Rp 7,059,818.84
	Karang keras hidup (HCL)	m <sup>2</sup>	3.32E+00	1.23E+14	( f )	4.09E+14	Rp 7,114,086.60
D	Nilai Sumberdaya Pada Zona Perikanan						
1	Matahari	j	6.38E+09	1.00E+00	( b )	6.38E+09	Rp 110.94
2	Pasang surut	j	1.94E+07	7.39E+04	( c )	1.44E+12	Rp 24,967.54
3	<i>Zooxanthellae</i>	j	6.61E+01	4.90E+05	( d )	3.24E+07	Rp 0.56
4	Megabentos	j	1.14E+05	4.46E+06	( d )	5.09E+11	Rp 8,853.85
5	Ikan karang	j	5.01E+05	5.84E+08	( e )	2.92E+14	Rp 5,086,797.15
	Karang keras hidup (HCL)	m <sup>2</sup>	2.40E+00	1.23E+14	( f )	2.94E+14	Rp 5,120,730.05

Keterangan: a = Pereira *et al.* (2013) dalam Paoli *et al.* (2017); b = Odum (1996); c = Brandt-Williams dan Brown (2011); d = Nilai Transformity mikroalga (Campbell, 2004); e = Mcclanahan (1990); f = Dihitung dalam penelitian ini



Informasi nilai atau harga ekosistem terumbu karang sangat berguna bagi pengelolaan ekosistem terumbu karang. Selain berguna untuk mendukung pengelola kawasan dalam penyusunan instrumen hukum yang mendukung pelestarian ekosistem terumbu karang juga berguna untuk meningkatkan kesadaran masyarakat. Beberapa kajian analisis penilaian/valuasi suatu ekosistem menggunakan analisis Emergy dengan tujuan yang sama telah dilakukan di beberapa kasus. Munasik *et al.* (2019), melakukan valuasi ekosistem terumbu karang berdasarkan input sumberdaya komponen penyusun dan jasa ekosistem yang diberikan terumbu karang di Taman Nasional Karimunjawa dengan nilai 2.896.814/m<sup>2</sup>/th. De La Fuente *et al.* (2019) menilai habitat *midlittoral*, di atas pinggiriran *Cystoseira* senilai 1,23E + 12 sej/m<sup>2</sup> yang setara dengan 1,28 eM€/m<sup>2</sup> (Rp. 20.785/m<sup>2</sup>). Kajian lebih umum, Sun *et al.* (2018), melakukan valuasi ekosistem pesisir pada 11 provinsi dan kota pesisir di Cina seluas 3 juta kilometer persegi senilai 9,821.17×10<sup>8</sup> yuan (Rp. 2,173,434,742,170,000), dengan Emergy sebesar 1.99×10<sup>17</sup> sej/km<sup>2</sup>.

## KESIMPULAN

Nilai ekosistem terumbu karang dapat ditentukan oleh nilai Emergy komponen penyusun ekosistem yaitu, Emergy matahari, pasang surut, *zooxanthellae*, megabentos, ikan terumbu karang dan karang keras hidup (sebagai *storage* di dalam ekosistem). Nilai ekosistem terumbu karang pada zona inti di Kawasan Konservasi Nasional Pulau Gili Matra lebih tinggi dibandingkan zona pemanfaatan dan zona perikanan.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Artikel ini adalah bagian dari Tesis Program Magister Ilmu Kelautan Universitas Diponegoro oleh penulis pertama. Terimakasih disampaikan kepada staf peneliti Balai Konservasi Kawasan Perairan Nasional Kupang Wilayah Kerja Gili Matra Lombok dan BKIPM Mataram atas bantuan pengumpulan data ekosistem terumbu karang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Benoist, N.M.A., Bett, B.J., Morris, K.J., & Ruhl, H.A. (2019). A generalised volumetric method to estimate the biomass of photographically surveyed benthic megafauna. *Progress in Oceanography*, 178, p.102188. doi :10.1016/j.pocean.2019.102188.
- Berrios, F., Campbell, D.E., & Ortiz, M., (2017). Emergy evaluation of benthic ecosystems influenced by upwelling in Northern Chile: Contributions of the ecosystems to the regional economy. *Ecological Modelling*, 359, 146–164. doi :10.1016/j.ecolmodel.2017.05.005.
- Berrios, F., Campbell, D.E., & Ortiz, M. (2018). Emergy-based indicators for evaluating ecosystem health: a Case study of three benthic ecosystem networks influenced by coastal upwelling in Northern Chile (SE Pacific Coast). *Ecological Indicators*, 95, 379–393. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.07.055.
- Brandt-Williams, S., & Brown, M. (2011) Renewable Emergy in earth's biomes. *Emergy Synthesis*, 6, 93–104. doi: 10.13140/2.1.1931.6485.
- Campbell, D.E. (2004). Evaluation and Emergy analysis of the Cobscook Bay Ecosystem. *Northeastern Naturalist*, 11, 355–424, doi: 10.1656/1092-6194(2004)11[355:EAEAOT]2.0.CO;2.
- Christensen, V., & Pauly, D. (1993). Trophic models of aquatic ecosystems, V. Christensen & D. Pauly (eds.), ICLARM Conference Proceedings, International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila.
- Cushing, D.H. (1958). The estimation of carbon in phytoplankton, *Rapports et procès-verbaux des réunions*, 144, 32–33.
- De Froe, E., Maier, S.R., Horn, H.G., Wolff, G.A., Blackbird, S., Mohn, C., Schultz, M., van der Kaaden, A.S., Cheng, C.H., Wubben, E., van Haastregt, B., Moller, E.F., Lavaleye, M., Soetaert, K., Reichart, G.J., & van Oevelen, D. (2022). Hydrography and food distribution during a tidal cycle above a cold-water coral mound. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 189, p.103854. doi: 10.1016/j.dsr.2022.103854.

- De La Fuente, G., Asnaghi, V., Chiantore, M., Thrush, S., Povero, P., Vassallo, P., Petrillo, M., & Paoli, C. (2019). The Effect of Cystoseira Canopy on the Value of Midlittoral Habitats in NW Mediterranean, an Emergy Assessment. *Ecological Modelling*, 404, 1–11, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.04.005.
- Dewiyanti, I., Mulyadi, M., Ulfa, M., Octavina, C., & Haridhi, H.A. (2021). Biodiversity of megabenthos and coral reef condition in Tuan Island, Aceh Besar. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 869(1), p.012041. doi: 10.1088/1755-1315/869/1/012041.
- Durden, J.M., Bett, B.J., Horton, T., Serpell-Stevens, A., Morris, K.J., Billett, D.S.M., & Ruhl, H.A. (2016). Improving the estimation of deep-sea megabenthos biomass: Dimension to wet weight conversions for abyssal invertebrates. *Marine Ecology Progress Series*, 552, 71–79. doi: 10.3354/meps11769.
- English, S., Wilkinson, C. & Baker, V. (1994). Survey manual for tropical marine resources. ASEAN-Australia Marine Science Project. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia.
- Froese, R., & Pauly, D. (2022). FishBase, *World Wide Web electronic publication*, www.fishbase.org, version (02/2022).
- Giyanto, Abrar, M., Manuputty, A., Siringoringo, R., Tuti, Y., & Zulfianita, D. (2017). Coral reef health monitoring guide, P2O LIPI, Jakarta, Indonesia.
- Kementerian Kelautan dan Perikanan. (2022). Ocean accounts of Indonesia - Pilot study: accounts of Gili Ayer, Gili Meno, and Gili Trawangan (Gili Matra) Marine Protected Area, Jakarta, Indonesia.
- LaJeunesse, T.C. (2020). Zooxanthellae. *Current Biology*, 30, R1110–R1113. doi: 10.1016/j.cub.2020.03.058.
- LaJeunesse, T.C., Parkinson, J.E., Gabrielson, P.W., Jeong, H.J., Reimer, J.D., Voolstra, C.R., & Santos, S.R. (2018). Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Current Biology*, 28, 2570-2580. doi: 10.1016/j.cub.2018.07.008.
- Mcclanahan, T.R. (1990). Hierarchical control of coral reef ecosystems, Disertasi, University of Florida, Florida, USA.
- Muller-Parker, G., D'Elia, C.F., Cook, C.B. (2015). Interactions Between Corals and Their Symbiotic Algae. In: Birkeland, C. (eds) *Coral Reefs in the Anthropocene*. Springer, Dordrecht. pp. 99–115. doi: 10.1007/978-94-017-7249-5.
- Munasik, Rahmadi, P., Winarso, G., & Haryanti, D. (2019). Policy brief : Coral Reef Ecosystem Valuation Case Study in Karimunjawa National Park. Diponegoro University, Semarang, Indonesia.
- Munro, C. (2013) *Diving methods for the study of marine benthos*, Ed.4, A. Eleftheriou (eds), John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781118542392.
- Odum. (1996) *Environmental accounting Emergy and environmental decision making*. John Wiley & Sons, Inc, New York, USA.
- Paoli, C., Montefalcone, M., Morri, C., Vassallo, P., & Bianchi, C.N. (2017). Ecosystem functions and services of the marine animal forests, S. Rossi *et al.* (eds.). *Marine Animal Forests*, 44: 1271-1312. doi: 10.1007/978-3-319-21012-4\_38.
- Paoli, C., Povero, P., Burgos, E., Dapuzeto, G., Fanciulli, G., Massa, F., Scarpellini, P., & Vassallo, P. (2018). Natural capital and environmental flows assessment in marine protected areas: The case study of Liguria region (NW Mediterranean Sea). *Ecological Modelling*, 368, 121–135. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.10.014.
- Pillay, R.M., Willis, B., & Terashima, H. (2005). Trends in the density of zooxanthellae in *Acropora millepora* (Ehrenberg, 1834) at The Palm Island Group, Great Barrier Reef, Australia. *Symbiosis*, 38, 209–226.
- Platt, T., & Irwin, B. (1973). Caloric content of phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 18, 306–310. doi: 10.4319/lo.1973.18.2.0306.
- Russ, G.R., Rizzari, J.R., Abesamis, R.A., & Alcalá, A.C. (2021) Coral cover a stronger driver of reef fish trophic biomass than fishing. *Ecological Applications*, 31,(1), e02224. doi: 10.1002/eap.2224.
- Sawall, Y., & Al-Sofyani, A. (2015). Biology of Red Sea Corals: Metabolism, Reproduction, Acclimatization, and Adaptation. In: Rasul, N., Stewart, I. (eds) *The Red Sea*. Springer Earth System Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 487-509. doi: 10.1007/978-3-662-45201-1\_28.

- Sun, C., Wang, Y., & Zou, W. (2018). The Marine Ecosystem Services Values for China Based on The Emergy Analysis Method. *Ocean and Coastal Management*, 161, 66–73. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2018.04.022.
- Vassallo, P., Paoli, C., Buonocore, E., Franzese, P.P., Russo, G.F., & Povero, P. (2017). Assessing The Value of Natural Capital in Marine Protected Areas: A Biophysical and Trophodynamic Environmental Accounting Model. *Ecological Modelling*, 355, 12–17. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2017.03.013.
- Wildlife Conservation Society. (2019). Ecological survey result report at TWP Gili Matra in 2019. Jakarta, Indonesia.