

Konsentrasi Gas Metana pada Tiga Zona Komunitas Mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali

I Putu Sugiana¹, Elok Faiqoh^{1*}, Gede Surya Indrawan¹, I Wayan Eka Dharmawan²

¹Program Studi Ilmu Kelautan Universitas Udayana

²Pusat Penelitian Oseanografi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

Abstrak

Mangrove menjadi salah satu ekosistem lahan basah yang berperan penting dalam menyerap karbon. Namun, secara alami ekosistem mangrove juga mampu mengemisikan gas rumah kaca ke dalam atmosfer. Metana merupakan salah satu gas rumah kaca yang berdampak signifikan terhadap perubahan iklim. Penelitian tentang siklus metana telah dilakukan di ekosistem mangrove TAHURA Ngurah Rai Bali. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur konsentrasi gas metana pada tiga zona ekosistem mangrove. Metode *chamber* tertutup digunakan dalam pengambilan sampel gas yang kemudian dianalisis dalam gas kromatografi dengan sensor *flame ionization detector* (FID). Karakter ekologi mangrove yang terdiri dari parameter struktur komunitas mangrove dan lingkungan diukur dari setiap plot kuadrat pengambilan sampel gas. Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi gas metana tertinggi ditemukan pada zona darat dengan rata-rata $3,698 \pm 0,986$ mg. L⁻¹. Walaupun demikian, konsentrasi gas metana pada dua zona lainnya tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dengan zona darat. Variabilitas konsentrasi gas metana tidak berbeda signifikan dengan kondisi struktur komunitas mangrove yang berbeda antar zona. Penelitian ini hanya menemukan variasi nilai potensial redoks (ORP) yang berhubungan signifikan dengan konsentrasi gas metana. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa karakter ekologi mangrove yang cukup seragam di kawasan sehingga, tidak menimbulkan perbedaan yang signifikan pada konsentrasi gas metana antar zona. Namun, parameter kondisi substrat lainnya perlu dilibatkan dalam penelitian berikutnya.

Kata kunci: Mangrove, Gas rumah kaca, Metana, TAHURA Ngurah Rai, Struktur komunitas

Abstract

Mangrove is one of the wetland ecosystems that play an important role in carbon sequestration and storage. However, the ecosystem also emits greenhouse gas into the atmosphere naturally. Methane has been considered as a significant effect on global warming. A preliminary study in a part of the carbon cycle was conducted on the mangrove ecosystem in Ngurah Rai Forest Park Bali. This study was aimed to determine methane gas concentration in three different mangrove zones. Gas samples were collected by closed chamber method and they were analyzed using gas chromatography embedded with the flame ionization detector (FID) sensor. Mangrove ecological parameters i.e. community structure and environmental condition were determined on each quadratic plot where gas samples were collected. The result showed that the highest methane concentration was found in the landward zone at $3,698 \pm 0,986$ mg. L⁻¹. Even though, the methane concentration of the other zones had not significantly different from the landward zone. In addition, the mangrove community structure among the three zones was not different significantly. The oxidation-reduction potential was the only factor that had a significant correlation with methane concentration. Those results indicated that mangrove ecological conditions among zones were similar to each other, hence the variation of methane concentration was not significant. Nevertheless, substrate abiotic characters need to be involved in greenhouse gas studies in the future.

Keywords: Mangrove, Greenhouse gas, Methane, Ngurah Rai Forest Park, Community structure

Citation: Sugiana, I.P., Faiqoh, E., Indrawan, G.S. dan Dharmawan, I.E. (2021). Konsentrasi Gas Metana pada Tiga Zona Mangrove di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 422-431, doi:10.14710/jil.19.2.422-431

1. Pendahuluan

Mangrove merupakan tumbuhan halopita yang hidup di wilayah pesisir (Flowers dan Colmers, 2015). Mangrove memiliki tiga fungsi utama yakni mencegah bencana alam seperti tsunami, badai dan gelombang di wilayah pesisir sebagai fungsi adaptasi, menjadi tempat nursery ground sebagai fungsi tempat hidup,

serta menyerap dan menyimpan karbon biru sebagai fungsi mitigasi (Adilah dkk, 2018). Dalam upayanya sebagai penyimpan karbon, rata-rata mangrove menyimpan karbon sebesar 937 tC. ha⁻¹ dalam bentuk biomassa dan mengakumulasi karbon tanah sebesar 174 gC m⁻². tahun⁻¹. Meskipun hanya menyerap 1% (13,5 Gt. tahun⁻¹) karbon dibandingkan pada seluruh hutan di dunia namun, mangrove yang menjadi salah

* Penulis korespondensi: sugianaserangan@gmail.com

satu habitat pesisir terbesar yang dapat menyerap 14% karbon pada laut secara global (Alongi dkk, 2014). Simpanan karbon yang terganggu akibat deforestasi dapat menyebabkan emisi gas yang tinggi hingga pada akhirnya menyebabkan perubahan iklim terjadi (Arias-Ortiz dkk, 2020).

Metana merupakan gas rumah kaca yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global dengan daya serap panas 34 kali lebih besar dibandingkan karbondioksida yang merupakan emisi gas terbesar di atmosfer (Myhre dkk, 2013). Saat ini, gas metana telah meningkat 5-10 ppb per tahun pada atmosfer bumi (Reay dkk, 2018). Menurut Prayitno (2016) metana umumnya diproduksi pada lahan basah salah satunya adalah ekosistem mangrove, melalui proses metanogenesis. Hasil penelitian Marinho dkk (2013) menyebutkan bahwa sedimen mangrove yang bersifat anoksik dengan ketersediaan bahan organik yang tinggi menjadi tempat yang sesuai bagi bakteri anaerobik untuk memproduksi gas metana. Posisi mangrove yang berdekatan dengan pemukiman sering mengalami polusi nutrien akibat aktivitas antropogenik yang dimana, hal ini dapat memicu tingginya proses metanogenesis sehingga produksi gas metana akan menjadi sangat tinggi pada wilayah mangrove (Zheng dkk, 2018).

Taman Hutan Raya (TAHURA) Ngurah Rai merupakan kawasan hutan mangrove terbesar di Bali, dengan luas 1373,7 Ha yang terbentang dari dua wilayah yakni Kota Denpasar dan Kabupaten Badung (Mangrove Information Center, 2004). Menurut Mahasani dkk (2016) kawasan hutan mangrove rehabilitasi di TAHURA Ngurah Rai Bali memiliki potensi simpanan karbon organik sedimen mencapai 216,168 Mg C. ha⁻¹. Berdasarkan laporan dari Lugina dkk (2017) dilihat dari historisnya, hutan mangrove yang direhabilitasi merupakan bekas industri pertambangan oleh masyarakat sekitar pada tahun 1980an. Selain itu, kawasan TAHURA Ngurah Rai Bali juga dikelilingi oleh beberapa sungai kecil yang mengalir dari pemukiman di darat dan bermuara menuju laut, industri pengolahan limbah air serta tempat pembuangan sampah. Beberapa hal tersebut dapat menjadi sumber dari pengkayaan nutrien berupa bahan organik selain dari produktivitas alami mangrove itu sendiri yang menjadi indikator dari tingginya emisi gas rumah kaca. Sehingga, penelitian tentang emisi gas rumah kaca sangat menarik dilakukan pada lokasi tersebut. Tujuan dari penelitian ini untuk mengukur konsentrasi gas metana yang teremisikan dari sedimen ke atmosfer di Kawasan TAHURA Ngurah Rai Bali. Penelitian ini juga melibatkan karakter ekologi mangrove di dalam kawasan antara lain struktur komunitas mangrove dan faktor lingkungan. Analisis hubungan antara konsentrasi gas metana dengan karakter ekologi mangrove diharapkan mampu menjelaskan salah satu peranan ekosistem mangrove dalam mitigasi perubahan iklim.

2. Metode

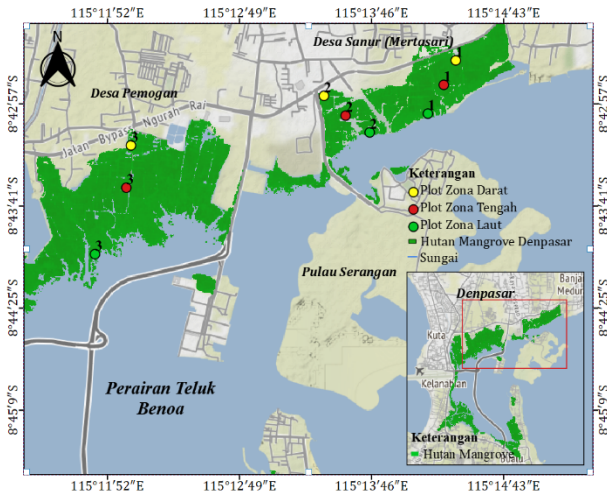
2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan pada Oktober 2020 – Januari 2021 berlokasi di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Plot pengambilan sampel ditentukan menggunakan metode *stratified purposive sampling* pada kawasan hutan mangrove yang terletak di tiga desa yakni Sidakarya, Serangan, dan Pemogan. Masing-masing wilayah dibagi menjadi tiga zona mangrove yakni zona darat, tengah dan laut yang ditentukan berdasarkan dominansi jenis mangrove sesuai dengan pedoman oleh Noor dkk (2006). Sebelum menentukan plot penelitian, survey lapangan dilakukan untuk menemukan kriteria lokasi yang sesuai dengan mempertimbangkan aksesibilitas. Setiap plot zona dilakukan pengambilan sampel gas dan data ekologi mangrove didalam plot kuadrat berukuran 10m x 10m sebanyak tiga kali ulangan. Total data yang diambil sebanyak 27 buah dari masing-masing sampel gas dan ekologi mangrove. Plot zonasi dapat dilihat pada Gambar 1.

2.2 Pengambilan Sampel Gas

Sampel gas diambil diatas permukaan sedimen ± 25 cm dengan menggunakan *chamber* tertutup sebagai pembatas yang telah banyak diterapkan oleh peneliti Lekphet dkk (2005); Chen dkk (2014); Dharmawan (2016); Zheng dkk (2018); Lin dkk (2020). Tiga buah *chamber* gas berukuran panjang, lebar dan tinggi masing-masing 20cm x 20cm x 25cm yang dilengkapi dengan dua katup berdiameter ± 0,5 cm pada bagian samping dan atas, digunakan dalam penelitian ini. Proses pengambilan sampel gas diawali dengan *chamber* gas diletakkan telungkup, kemudian dibenamkan pada sedimen dengan kedalaman ± 2 cm. Pengambilan sampel gas dilakukan sebanyak tiga ulangan dengan masing-masing sekali ulangan pada tiap *chamber* dalam waktu yang bersamaan. Sampel gas diambil menggunakan *syringe* sebanyak 10 ml dan disimpan di dalam tabung darah *vacutainer* kosong 10 ml. Sampel gas dianalisis di Laboratorium Balai Penelitian Lingkungan Pertanian di Jawa Tengah untuk dilakukan pengukuran konsentrasi gas metana.

Konsentrasi gas metana dianalisis dengan gas kromatografi (GC) Agilent 7890A yang telah dilengkapi dengan *flame ionization detector* (FID) sebagai pengukur konsentrasi gas metana. Setiap sampel diambil 1 ml untuk diinjeksikan ke dalam GC. Dalam analisis akan dibuat kurva standar sebagai acuan menggunakan gas standar yang sudah terkonsentrasi oleh gas metana dalam konsentrasi tertentu. Konsentrasi gas metana dihitung dengan membandingkan luas peak/puncak sampel dengan kurva standar yang telah dibuat.



Gambar 1. Distribusi titik pengambilan data pada setiap zonasi mangrove di TAHURA Ngurah Rai Bali

2.3 Pengukuran Karakter Ekologi Mangrove

Data komunitas mangrove yang diambil berupa kerapatan tegakan (pohon dan pancang), tutupan kanopi dan morfometrik mangrove (diameter dan tinggi). Data kerapatan tegakan diambil dengan menghitung jumlah tegakan yang ditemukan di dalam setiap plot lalu, pengambilan data tutupan kanopi dengan metode *hemispherical photography* menggunakan kamera dengan resolusi diatas 3 *Mega pixel*. Sementara data morfometrik berupa diameter batang diukur menggunakan meteran kain dan tinggi pohon diestimasi menggunakan perangkat lunak *protactor* yang dapat diunduh pada telepon pintar. Semua metode pengambilan data mengikuti pedoman dari COREMAP CTI LIPI yang dibuat oleh Dharmawan dkk (2020).

Selain data komunitas mangrove, parameter lingkungan in-situ seperti suhu, pH, salinitas dan ORP (Oxidation-Reduction Potential) juga diambil dalam penelitian ini. Parameter lingkungan tersebut diukur pada air pori menggunakan *Multimeter COM-600 Water Quality Tester* mengikuti metode yang telah diterapkan oleh Marin-Muniz dkk (2015) dan Dharmawan (2016). Sampel air poros diambil menggunakan *pore water sampler* pada kedalaman 0-30 cm tepat pada posisi chamber yang menjadi batas rata-rata dari media perakaran mangrove menurut Ashton dan Macintos (2002). Pengambilan parameter lingkungan pada air poros didasarkan pada kajian Ulumuddin (2018) yang menyatakan perbedaan kondisi air poros dapat menjadi indikasi dari peningkatan konsentrasi metana.

Sedangkan, pada sampel sedimen diambil disetiap plot dengan 3 kali pengulangan tepat di bawah dari posisi chamber. Pengambilan sampel menggunakan pipa corer berdiameter 5 cm dan tinggi 30 cm pada kedalaman 0-30 cm. Sebanyak 100 gram sedimen diperlukan dan disimpan pada botol sampel untuk selanjutnya dianalisis di laboratorium. Analisis jenis

sedimen dilakukan menggunakan metode pengamatan visual (megaskopis) dengan bantuan kaca pembesar 10x, dan diidentifikasi berdasarkan diagram Wenworth (1922). Hasil dari analisis sedimen juga disandingkan dengan penelitian oleh Prinasti dkk (2020) yang melakukan pengukuran karakteristik jenis sedimen mangrove pada lokasi yang sama.

Analisis Data

Data univariat dari setiap parameter dianalisis secara deskriptif kuantitatif menggunakan perhitungan ukuran tendensi sentral dengan luaran nilai rata-rata, dan perhitungan ukuran penyebaran dengan luaran nilai standar deviasi pada *microsoft excel*. Luaran yang dapat berupa nilai rata-rata konsentrasi gas metana dan parameter karakter ekologi, serta nilai standar deviasi digunakan untuk mencari besarnya perbedaan terhadap nilai rata-rata dari tiap parameter. Analisis variansi (ANOVA) berupa uji homogenitas dan uji normalitas dilakukan pada masing-masing data untuk mengetahui sifat dari sebaran data sebagai syarat uji lanjutan. Data yang terdistribusi normal dan homogen dilanjutkan dengan uji beda nyata Tukey untuk mengetahui perbedaan signifikansi antar zona dan juga dilakukan korelasi pearson untuk mengetahui tingkat kekuatan hubungan konsentrasi metana dengan parameter ekologi mangrove. Uji ini dilakukan pada perangkat lunak RStudio mengikuti pedoman dari Mathias (2015).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Variabilitas Komunitas Mangrove dan Lingkungan

Secara umum, zona laut memiliki indeks nilai penting (INP) terbesar yakni 300%. Sedangkan zona darat hanya memiliki INP tertinggi sebesar 107,08 %. Kedua zona ini masing-masing didominasi oleh jenis *S. alba*, namun pada zona darat lebih beragam. Hasil yang serupa ditemukan oleh Dharmawan dan Pramudji (2020) yang dilakukan di Pulau Owi dan Pulau Wundi Papua dengan INP jenis *S. alba* mencapai 300%, sementara Irwansah dkk (2019) yang melakukan penelitian di Teluk Serewe Lombok menemukan jenis mangrove beragam mirip dengan zona darat dengan, INP terbesar 166,38 % pada jenis yang sama. Kesamaan karakteristik substrat yang berpasir dengan sedikit lumpur membuat mangrove jenis *S. alba* tumbuh subur di kedua zona.

Sementara itu, zona tengah hanya ditemukan kelompok mangrove Rhizophoraceae dengan jenis *R. apiculata* yang mendominasi terlihat dari INP sebesar 175,11 %. Kelompok mangrove ini sering menempati barisan kedua setelah *S. alba* yang mirip dengan penelitian Parmadi dkk (2016) di Aceh Timur dengan INP 203,12% pada jenis *R. apiculata* di zona yang sama. Sasauw dkk (2016) juga menemukan kondisi yang mirip di Manado, dengan INP sebesar 130,90 %. Didukung dengan penelitian Prinasti dkk (2020) pada lokasi yang sama, karakteristik sedimen lumpur

berpasir merupakan yang paling sesuai untuk pertumbuhan mangrove jenis ini. Hal tersebut karena mangrove *Rhizophora* tumbuh dengan akar tunjang yang kokoh sehingga dapat menopang pertumbuhannya pada sedimen berlumpur.

Dominansi jenis mangrove juga mempengaruhi kerapatan tegakan mangrove. Kerapatan tegakan terendah ditemukan pada zona laut sebesar 1633 ± 966 tegakan. ha⁻¹ karena didominasi oleh jenis *S. alba*. Hasil ini jauh lebih tinggi dari penelitian Nurdiansah dan Dharmawan (2021) dengan nilai kerapatan 800 ± 100 tegakan. ha⁻¹ yang dilakukan di Papua Barat. Mangrove jenis *S. alba* memiliki pneumatofor yang menghasilkan senyawa alelopati yang dapat menghambat pertumbuhan mangrove lain di area sekitarnya (Zhang dkk, 2018). Bila dibandingkan dengan zona tengah, perbedaan signifikan (ANOVA; $p < 0,05$) ditemukan karena adanya perbedaan jenis mangrove. Zona tengah yang hanya ditemukan mangrove jenis *R. apiculata* dan *R. mucronata* memiliki kerapatan mangrove 3922 ± 1654 tegakan. ha⁻¹. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan zona laut dengan nilai kerapatan yang rendah. Akan tetapi, nilai kerapatan mangrove masih lebih sedikit bila dibandingkan dengan penelitian Hidayatullah dan Pujiono (2014) di Manggarai Barat yang mencapai 6750 tegakan. ha⁻¹ pada jenis yang sama. Sementara itu, zona darat dengan jenis mangrove beragam memiliki nilai kerapatan 2356 ± 2063 tegakan. ha⁻¹. Nilai tersebut masih lebih rendah dari zona tengah karena mangrove jenis *S. alba* juga ditemukan dalam zona ini.

Variasi nilai persentaseutupan kanopi menunjukkan zona laut memiliki nilai terendah $38,85 \pm 16,14$ % yang berbeda signifikan (ANOVA; $p < 0,05$) dengan zona darat dan tengah, karena memiliki nilai persentaseutupan kanopi tinggi masing-masing $74,46 \pm 6,466$ % dan $78,92 \pm 1,25$ %. Perbedaan nilai persentaseutupan kanopi disebabkan oleh perbedaan jenis mangrove yang ditemukan. Mangrove jenis *S. alba* memiliki pertumbuhan kanopi *spreading crown*

(menyebarkan ke area sekitar) sehingga, cenderung memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan kelompok mangrove *Rhizophora* dengan pertumbuhan kanopi *conical crown* (kerucut) (Dharmawan, 2020).

Faktor kerapatan juga memiliki pengaruh terhadap nilai persentaseutupan kanopi. Semakin rapat tegakan pohon maka semakin tinggi nilaiutupan kanopi. Hal ini ditemukan pada zona darat dan tengah dengan distribusi tegakan yang rapat danutupan kanopi yang lebat. Sementara hasil yang berbeda ditemukan pada zona laut yang memiliki kerapatan tegakan dengan kanopi yang rendah. Hasil yang serupa juga ditemukan oleh Dharmawan dkk (2020) di Tanjung Barari dengan nilai $50,92 \pm 8,33$ % yang merupakan zona dengan dominansi mangrove *S. alba* dan di Muara Kali Ruar dengan nilai $88,14 \pm 1,07$ % yang didominasi kelompok *Rhizophoraceae*.

Secara morfometrik zona laut memiliki ukuran diameter batang yang lebih besar $13,63 \pm 1,78$ cm dibandingkan zona tengah dan darat yang lebih kecil dari 10 cm (Tabel 1). Perbedaan signifikan (ANOVA; $p < 0,05$) ditemukan pada zona laut dengan kedua zona lainnya. Hal ini disebabkan karena jenis *S. alba* memiliki pertumbuhan diameter yang lebih besar dibandingkan jenis mangrove lainnya. Hasil tersebut mirip dengan penelitian yang dilakukan oleh Nurdiansah dan Dharmawan (2021) dengan, nilai diameter batang terbesar mencapai $24,67 \pm 4,96$ cm ditemukan pada zona yang didominasi oleh mangrove jenis *S. alba*.

Mangrove di TAHURA Ngurah Rai secara umum memiliki ukuran tegakan yang rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ketinggian tegakan pada zona laut, tengah dan darat adalah sebesar $9,42 \pm 3,28$ m, $11,92 \pm 0,81$ m dan $9,96 \pm 2,03$ m secara berturut-turut. Rata-rata ketinggian tegakan mangrove tidak menunjukkan nilai yang berbeda signifikan (ANOVA; $p > 0,05$) antar zona. Pola distribusi tinggi mangrove yang sama ditemukan oleh Hermawan dkk (2014) yang juga melakukan penelitian di TAHURA Ngurah Rai Bali.

Tabel 1. Data komunitas dari tiga zona penelitian di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Simbol huruf ab menunjukkan hasil uji Tukey dimana huruf yang sama pada kolom yang sama tidak memiliki perbedaan nilai secara signifikan ($p < 0,05$) (SA: *Sonneratia alba*; XG: *Xylocarpus granatum*; RA: *Rhizophora apiculata*; RM: *Rhizophora mucronata*, n/a: tidak ada)

Parameter	Zona		
	Darat	Tengah	Laut
Kerapatan tegakan (tegakan/ha)	2356 ± 2063ab	3922 ± 1654a	1633 ± 966b
Tinggi (m)	9,96 ± 2,03a	11,92 ± 0,81a	9,42 ± 3,28a
Diameter (cm)	9,53 ± 2,21a	8,23 ± 0,62a	13,63 ± 1,78b
Tutupan kanopi (%)	74,46 ± 6,47a	78,92 ± 1,25a	38,85 ± 16,14b
Jumlah jenis	6	2	1
INP (%)			
Tertinggi	SA: 107,08%	RA: 175,11%	SA: 300%
Terendah	XG: 9,30%	RM: 124,89%	n/a

Tabel 2. Data kondisi lingkungan pada air poros dari tiga zona penelitian di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. Simbol huruf ab menunjukkan hasil uji Tukey dimana huruf yang sama pada kolom yang sama tidak memiliki perbedaan nilai secara signifikan ($p < 0,05$)

Parameter	Zona		
	Darat	Tengah	Laut
Karakteristik sedimen	Berlumpur	Berlumpur	Pasir berlumpur
Suhu (°C)	29,81 ± 1,408a	29,88 ± 1,016a	30,41 ± 2,169a
pH	6,57 ± 0,243a	6,59 ± 0,113a	7,04 ± 0,121b
Salinitas (‰)	24,87 ± 1,41a	24,67 ± 2,67a	29,08 ± 0,59b
TDS (mg/L)	22,07 ± 3,95a	20,33 ± 1,93a	23,72 ± 0,53a
ORP (mV)	-108,11 ± 71,635a	-20,11 ± 71,51ab	20,56 ± 82,771b

Adanya perbedaan pertumbuhan dari tinggi mangrove disebabkan oleh perbedaan dari jenis yang ditemukan. Di zona tengah, hanya ditemukan mangrove kelompok Rhizophoraceae yang rata-rata tumbuh mengerucut keatas, sedangkan pada zona laut hanya ditemukan jenis *S. alba* dengan pertumbuhan merambat kesamping. Perbedaan pola pertumbuhan berkaitan dengan kompetisinya dalam mendapatkan cahaya matahari untuk proses fotosintesis (Dharmawan, 2020).

Rata-rata suhu tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan (ANOVA; $p > 0,05$) antar zona. Nilai suhu tertinggi ditemukan pada zona laut 30,41 ± 2,169 °C sedangkan terendah pada zona darat 29,81 ± 1,408 °C. Kekuatan radiasi matahari juga dibatasi oleh tutupan kanopi mangrove. Semakin tinggi tutupan kanopi maka semakin rendah intensitas cahaya matahari yang masuk (Von Arx dkk, 2013). Hal tersebut juga mempengaruhi distribusi nilai suhu yang terlihat pada zona laut, dengan suhu tertinggi karena memiliki tutupan kanopi yang renggang. Hasil ini mirip penelitian Yusuf dan Muhsoni (2020) pada ekosistem mangrove di Kabupaten Bangkalan, yang menemukan nilai suhu tertinggi 31,1 °C dengan tutupan kanopi terendah 67,37 %. Selain pengaruh kanopi, nilai suhu pada air poros mengalami variasi seiring dengan perbedaan waktu pengukuran sampel sesuai penelitian Arizuna dkk (2014) yang menemukan suhu lebih tinggi di siang hari.

Tingkat keasaman air poros yang ditunjukkan oleh nilai pH di zona laut memiliki perbedaan nilai signifikan (ANOVA; $p < 0,05$) dengan kedua zona lainnya. Nilai pH tertinggi ditemukan pada zona laut 7,04 ± 0,121 sedangkan terendah di zona darat 6,57 ± 0,243. Pola distribusi pH ini mirip dengan penelitian Poedjirahajoe dkk (2017) di Pantai Utara Pemalang dengan, nilai pH yang ditemukan tinggi 7,35 di zona dekat laut dan terendah 7,15 di zona tengah. Nilai pH rendah dapat mengindikasikan tingginya proses dekomposisi karbon organik oleh mikroorganisme sesuai dengan hasil penelitian Albino dkk (2015).

Distribusi salinitas menunjukkan zona laut memiliki nilai tertinggi 29,08 ± 0,59 ppt, zona tengah 24,67 ± 2,67 ppt dan zona darat 24,87 ± 1,41 ppt. Nilai salinitas zona laut ditemukan berbeda signifikan

(ANOVA; $p < 0,05$) dengan kedua zona lainnya. Penelitian Matatula dkk (2019) di Teluk Kupang Nusa Tenggara Barat menemukan, wilayah zona yang letaknya berdekatan dengan laut cenderung memiliki nilai salinitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan zona yang mencorok kedalam.

Variasi nilai salinitas menyebabkan adanya penggolongan habitat mangrove berdasarkan posisinya geomorfologinya (Lugo dan Snedaker, 1974). Pada daerah teluk, nilai salinitas sering menunjukkan kemiripan sesuai dengan penelitian Patrice dkk (2012) di Teluk Manado. Bila dibandingkan dengan kajian oleh Surinati dan Corvianawatie (2019), salinitas di perairan pulau-pulau kecil di Papua Utara dapat mencapai 34,38 ppt, yang artinya jauh lebih tinggi daripada salinitas air poros di TAHURA Ngurai Rai Bali. Meskipun begitu, nilai ini masih lebih tinggi dibandingkan dengan daerah mangrove *riverine* di Perancak oleh Susiana (2015) dengan, nilai salinitas 17,41 – 22,87 ppt yang cenderung dipengaruhi oleh aliran air sungai yang tawar.

Variasi salinitas menyebabkan adanya stratifikasi jenis yang jelas pada ekosistem mangrove TAHURA Ngurah Rai Bali. Komposisi zonasi dari laut ke darat didominasi secara berurutan oleh jenis *Sonneratia*, *Rhizophora* dan *Bruguiera* (Noor dkk, 2006). *Sonneratia* umumnya toleran pada salinitas tinggi mencapai 36,493 ± 1,62 ppt menurut Pillai dan Harilal (2016). Sementara, *Rhizophora apiculata* cenderung tumbuh dengan rentang salinitas yang lebih lebar dari 5 – 30 ppt (Basyuni dkk, 2019).

Distribusi potensial redoks (ORP) menunjukkan nilai yang bervariasi dimana, nilai ORP tertinggi ditemukan pada zona laut 20,56 ± 82,771 mV sedangkan terendah pada zona darat -108,11 ± 71,635 mV. Hasil tersebut memiliki perbedaan signifikan (ANOVA; $p < 0,05$) diantara kedua zonasi, sementara zona tengah memiliki nilai rata-rata yang berada diantara kedua zona lainnya -20,11 ± 71,51 mV. Pola distribusi ORP sama dengan penelitian Mustafa dkk (2011) di Sulawesi Barat yang mendapatkan nilai negatif pada zona mangrove darat. Rendahnya nilai ORP mengindikasikan tingginya proses dekomposisi karbon organik oleh mikroorganisme begitupun sebaliknya (Hall dkk, 2013).

Tabel 3. Hasil Korelasi Pearson Hubungan Konsentrasi Gas Metana dengan Parameter Komunitas Mangrove dan Lingkungan. Simbol * menunjukkan hubungan yang signifikan ($p < 0,05$)

Parameter	Koefisien korelasi
	Sesudah
Kerapatan tegakan (tegakan/ha)	0,102
Diameter (cm)	-0,272
Suhu (°C)	0,024
pH	-0,208
Salinitas (ppt)	-0,385
ORP (mV)	-0,586*

Karakteristik substrat berperan penting dalam ketersediaan bahan organik. Sedimen berlumpur memiliki ukuran partikel yang lebih halus cenderung menyediakan bahan organik yang melimpah sehingga, proses dekomposisi oleh mikroorganisme menjadi sangat tinggi (Huang dkk, 2018). Hal ini ditemukan pada zona darat dan tengah dengan nilai ORP rendah karena memiliki karakteristik sedimen yang berlumpur. Sementara, di zona laut dengan sedimen berpasir memiliki nilai ORP yang tinggi. Sedimen berpasir dengan tingkat kerapatan renggang memudahkan masuknya oksigen yang terlarut kedalam air poros (Pepper dan Brusseau, 2019). Hal ini menyebabkan proses oksidasi lebih dominan terjadi dan membuat ORP menjadi positif (Zhai dkk, 2012).

Struktur komunitas mangrove memiliki hubungan secara tidak langsung terhadap nilai ORP. Kesesuaian jenis mangrove terhadap lingkungan tempat pertumbuhan menjadi alasan utama yang berhubungan dengan ORP. Mangrove kelompok Rhizophoraceae yang ditemukan pada zona darat dan tengah memiliki nilai ORP lebih rendah karena hidup pada sedimen yang berlumpur. Sementara itu, jenis *S. alba* pada zona laut cenderung memiliki nilai ORP yang tinggi karena tumbuh pada sedimen berpasir. Perbedaan kerapatan mangrove juga menjadi salah satu parameter yang berhubungan dengan variasi nilai ORP. Mangrove dengan pertumbuhan yang rapat dapat berkontribusi besar terhadap kelimpahan bahan organik sesuai dengan penelitian Lestaru (2018) dengan nilai hubungan yang cukup kuat ($r = 0,594$). Maka dari itu, zona darat dan tengah cenderung memiliki nilai ORP lebih rendah dibandingkan dengan zona laut karena, memiliki nilai kerapatan mangrove yang lebih tinggi.

3.2. Konsentrasi Gas Metana

Hasil dari pengukuran menemukan konsentrasi gas metana tertinggi pada zona darat sebesar $3,698 \pm 0,986 \text{ mg. L}^{-1}$ dan terendah $2,502 \pm 0,225 \text{ mg. L}^{-1}$ pada zona laut. Tidak ada perbedaan nilai rata-rata signifikan (ANOVA; $p > 0,05$) yang ditemukan antar zona karena TAHURA Ngurah Rai Bali merupakan

ekosistem mangrove yang masuk dalam wilayah teluk. Penelitian oleh Lekphet dkk (2005) Di Provinsi Ranong, Thailand juga menemukan hasil yang sama bahwa emisi metana tidak signifikan pada wilayah teluk. Kondisi mangrove di teluk cenderung mengemis gas metana yang lebih tinggi dibandingkan dengan mangrove di pulau-pulau kecil yang tidak terlalu dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik. Hal ini dibuktikan dari perbandingan hasil kajian oleh Chen dkk (2014) di Sulawesi Utara yang mengemis gas metana lebih rendah. Sehingga, hal tersebut menjadi salah satu bukti bahwa ekosistem mangrove TAHURA Ngurah Rai Bali, berpotensi besar dalam mengemis gas metana yang tinggi.

Konsentrasi gas metana di TAHURA Ngurah Rai Bali masih jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan rata-rata konsentrasi gas metana di atmosfer, yang bernilai 1800 ppb atau $1,8 \text{ mg. L}^{-1}$ berdasarkan hasil laporan dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) tahun 2018 (Andrew, 2018). Namun, nilai konsentrasi tersebut masih berada dibawah standar pengukuran metana di ekosistem padang lamun yakni $9,7 \text{ mg. L}^{-1}$ yang dilakukan oleh Garcias-Bonet dan Duarte (2017) dan Burkholz dkk (2020) di Laut Merah. Bahkan, Jorgensen dkk (2019) melaporkan konsentrasi gas metana dapat mencapai nilai tertinggi hingga $> 100 \text{ mg. L}^{-1}$ pada atmosfer di lapisan es Greenland. Hal ini disebabkan oleh penggunaan metode yang berbeda dimana, pengukuran dilakukan menggunakan *Low-cost metal oxide gas sensors* (MOS) yang rentang terhadap gangguan kondisi atmosfer seperti suhu dan kelembaban (Sohn dkk, 2008; Masson dkk, 2015).

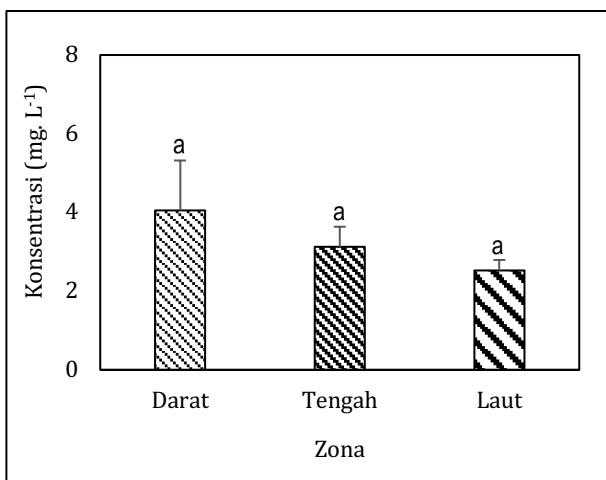
Nilai konsentrasi gas metana pada ekosistem mangrove TAHURA Ngurah Rai Bali yang lebih tinggi dari rata-rata kondisi atmosfer, mengindikasikan bahwa ekosistem tersebut menjadi salah satu kontributor penyumbang gas metana di atmosfer. Berdasarkan kajian metana Ulumuddin (2018) kondisi substrat, pH, salinitas dan ORP menjadi indikator utama yang berhubungan dengan emisi metana. Sementara itu, struktur komunitas mangrove hanya menjadi faktor sekunder yang mempengaruhi metana menurut kajian dari Dharmawan (2016). Ekosistem mangrove yang terganggu akibat alih fungsi lahan

tambak dan deforestasi, dapat mengganggu daya serap karbon pada mangrove seperti yang dilaporkan oleh Rudianto dkk, (2020) di Jawa Timur. Peristiwa tersebut juga dialami di TAHURA Ngurah Rai Bali seperti yang dilaporkan oleh Sundra (2016). Hal ini membuktikan peranan ekosistem mangrove di wilayah penelitian sebagai penyerap karbon, sedang mengalami gangguan dari segi ekologi mangrove.

3.3. Hubungan Gas Metana dengan Kondisi Ekologi Mangrove

Metana merupakan gas rumah kaca yang diproduksi dalam kondisi lingkungan anarob (Cui dkk, 2014). Ekosistem mangrove umumnya bersifat anaerob karena sering mengalami polusi nutrien yang berpotensi sebagai produktor metana (Ulumuddin, 2018). Adanya gangguan kondisi komunitas mangrove dapat berpengaruh terhadap produksi dari metana itu sendiri. Akan tetapi, pada penelitian ini parameter komunitas mangrove tampaknya tidak berhubungan signifikan (Pearson; $p > 0,05$) dengan nilai konsentrasi gas metana. Hasil yang sama juga di laporkan oleh Dharmawan (2016) di Pulau Bintan yang menyebutkan kondisi sedimen dan air pori lebih cenderung berhubungan erat dengan emisi metana daripada komunitas mangrove itu sendiri.

Hasil yang signifikan (Pearson; $p < 0,05$) ditemukan pada hubungan ORP dengan konsentrasi metana, dengan koefisien korelasi sebesar -0,586. Nilai koefisien yang negatif menandakan semakin rendah ORP maka semakin tinggi konsentrasi gas metana. Hasil tersebut didukung oleh penelitian Magonigal dkk (2013) yang menyatakan produksi gas metana akan meningkat seiring penurunan potensial redoks.



Gambar 2. Konsentrasi gas metana pada tiga zona komunitas mangrove di TAHURA Ngurah Rai Bali. Simbol huruf a yang sama menunjukkan perbedaan nilai rata-rata yang tidak signifikan berdasarkan hasil uji Tukey

Potensial redoks (ORP) merupakan parameter yang dapat menandakan kondisi lingkungan bersifat aerobik atau anaerobik. Nilai ORP pada lingkungan anaerobik yang optimum untuk metabolisme metanogen berkisar antara -100 mV hingga -200 mV (Aulakh, 2001). Kondisi tersebut ditemukan pada zona darat sehingga, di zona ini memiliki nilai konsentrasi gas metana lebih tinggi dibandingkan zona lainnya.

Selain beberapa parameter diatas, kondisi ekologi seperti suhu, pH dan salinitas juga memiliki hubungan dengan emisi metana. Berdasarkan laporan dari Datta dkk (2013) dan Lofton dkk (2014) suhu yang tinggi dapat meningkatkan metabolisme dari bakteri sehingga, produksi gas metana menjadi sangat cepat. Namun dalam penelitian ini, nilai suhu tidak berbeda signifikan (Pearson; $p > 0,05$) antar zona sehingga tidak dapat menggambarkan variasi dari metana. Sementara itu, metanogen memiliki sifat neutrofilik yang memiliki metabolisme yang optimal pada kondisi pH normal (Koebsch dkk, 2013; Magonigal dkk, 2013). Meskipun nilai pH yang ditemukan pada tiap zona darat dengan kedua zona lainnya berbeda signifikan (Pearson; $p < 0,05$) namun, rentang nilai pH masih dalam kondisi normal. Hal ini menjadi alasan dari hubungan pH terhadap konsentrasi metana yang tidak signifikan.

Sementara itu, kondisi salinitas lingkungan memiliki kaitan terhadap kompetisi yang terjadi terhadap metanogen dengan non-metanogen (Ulumuddin, 2018). Nilai salinitas tinggi dapat mengindikasikan tingginya ion sulfat sehingga, dapat meningkatkan aktivitas bakteri pereduksi sulfat yang menjadi penghambat metanogen dalam proses dekomposisi karbon organik (Purvaja dkk, 2004; Chauhan dkk, 2015; Padhy dkk, 2020). Hal tersebut dibuktikan dari zona laut dengan nilai salinitas yang paling tinggi dibanding zona lainnya, memiliki nilai konsentrasi metana yang paling rendah. Akan tetapi, jika dilihat secara keseluruhan nilai salinitas tidak memiliki hubungan yang signifikan (Pearson; $p > 0,05$) dengan konsentrasi metana. Hal ini dikarena mangrove di TAHURA Ngurah Rai Bali merupakan wilayah teluk sehingga, memiliki distribusi salinitas yang tidak jauh berbeda dan hanya menjadi indikator tambahan dalam mengontrol emisi metana.

Selain dari karakteristik ekologi mangrove yang, faktor pasang surut juga berkontribusi terhadap emisi gas metana dari ekosistem mangrove (Chen dkk, 2010). Zona laut memiliki durasi terendam air laut lebih lama, sehingga memiliki salinitas yang lebih tinggi dibandingkan zona yang lain sehingga, nilai konsentrasi metana menjadi rendah. Selain itu, pasang surut juga membantu dalam penyebaran karbon organik di sedimen. Menurut Adame dkk (2011), wilayah mangrove yang paling sering mengalami pasang surut memiliki komunitas karbon organik yang rendah begitupun sebaliknya. Hal ini tentu dapat berpengaruh terhadap produksi gas metana.

4. Kesimpulan

Konsentrasi gas metana di TAHURA Ngurah Rai Bali tergolong tinggi dibandingkan dengan rata-rata konsentrasi metana dalam atmosfer. Zona darat menjadi kontributor gas metana tertinggi karena memiliki kondisi substrat yang lebih aerobik berdasarkan nilai ORP. Sementara itu, variabilitas parameter lingkungan lainnya dan struktur komunitas mangrove antar zona belum mampu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap konsentrasi gas metana di dalam kawasan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi terbaru dalam menetapkan siklus karbon dari hutan mangrove yang tidak hanya mampu menyerap karbon namun juga dapat mengemisikan gas rumah kaca kedalam atmosfer.

DAFTAR PUSTAKA

- Adame, M.E., Lovelock, C.E. 2011. Carbon and nutrient exchange of mangrove forests with the coastal ocean. *Hydrobiologia*, 663: 23–50.
- Adilah, D., A.A. Akbar, Jumiaty. 2018. Peran Ekosistem Mangrove Bagi Mitigasi Pemanasan Global. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2): 1-8.
- Albino, P., Yunasfi, T. Siregar. 2015. Laju Dekomposisi Serasah Daun *Rhizophora mucronata* dan Kontribusinya Terhadap Nutrisi di Perairan Pantai Serambi Deli Kecamatan Pantai Labu. *Jurnal Aquacoastmarine*, 3(5): 1-11.
- Alongi DM. 2014. Carbon Cycling and Storage in Mangrove Forest. *Annual Review of Marine Science*. 6:195–219.
- Andrew, G. 2018. International Carbon Conference: The Methane Time Bomb. *Energy Procedia*, 146: 23-29.
- Arias-Ortiz, A., P. Masqué, Leah, G., Lisa, B., H. Kennedy, C.M. Duarte, Jordi, G.O., Claudia, R.B.N., Marc, S.H., I. Rafeijnahary, Jaona, R., Catherine, E.L. 2021. Losses of Soil Organic Carbon with Deforestation in Mangroves of Madagascar. *Ecosystems*, 24: 1–19.
- Arizuna, M., D. Suprpto, M.R. Muskananfolo. 2014. Kandungan Nitrat dan Fosfat dalam Air Pori Sedimen di Sungai dan Muara Sungai Wedung Demak. *Diponegoro Journal of Management of Aquatic Resources*, 3(1): 7-16.
- Ashton, E.C., Macintosh, D.J. 2002. Preliminary assessment of the plant diversity and community ecology of the Sematan mangrove forest, Sarawak, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 166: 111-129.
- Aulakh, M.S., R. Wassmann., H. Rennenberg. 2001. Methane emissions from rice fields - quantification, mechanisms, role of management, and mitigation options, *Advances In Agronomy*, 70(C): 193–260.
- Basyuni, M., M. Wasilah, P.A.J. Hasibuan, N. Sulistiyono, Sumardi, Y. Bimantara, Rahmah, H., H. Sagami, H. Oku. 2019. Salinity and subsequent freshwater influences on the growth, biomass, and polyisoprenoids distribution of *Rhizophora apiculata* seedlings. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 20(1): 288-295.
- Burkholz, C., N. Garcias-Bonet, C.M. Duarte. 2020. Warming enhances carbon dioxide and methane fluxes from Red Sea Seagrass (*Halophila stipulacea*) sediments. *Biogeosciences*, 17: 1711-1730.
- Chauhan, R., Datta, A., Ramanathan, A.L., Adhya, T.K. 2015. Factors influencing spatio-temporal variation of methane and nitrous oxide emission from a tropical mangrove of eastern coast of India. *Atmospheric Environment*, 107: 95–106.
- Chen, G.C., Tam, N.F.Y., Ye, Y. 2010. Summer fluxes of atmospheric greenhouse gases N₂O, CH₄ and CO₂ from mangrove soil in South China. *Science of the Total Environment*, 408: 2761–2767.
- Chen, G.C., Y.I. Ulumuddin., S. Pramudji., S.Y. Chen., B. Chen., Y. Ye., D.Y. Ou., Z.Y. Ma., H. Huang., J.K. Wang. 2014. Rich soil carbon and nitrogen but low atmospheric greenhouse gas fluxes from North Sulawesi mangrove swamps in Indonesia. *Science of the Total Environment*, 487: 91-96.
- Cui, M., A. Ma., H. Qi., X. Zhuang., G. Zhuang. 2014. Anaerobic oxidation of methane: an “active” microbial process. *MicrobiologyOpen*, 4(10): 1-11.
- Datta, A., J.B. Yeluripati., D.R. Nayak., K.R. Mahata., S.C. Santra., T.K. Adhya. 2013. Seasonal variation of methane flux from coastal saline rice field with the application of different organic manures, *Atmospheric Environment*, 66: 114–122.
- Dharmawan, I.W.E. 2016. Variasi Spasial Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) Pada Ekosistem Mangrove di Pulau Kelong, Bintan. Tesis, Institut Pertanian Bogor. 19 hlm.
- Dharmawan, I.W.E. 2020. Hemispherical Photography: Analisis Tutupan Kanopi Komunitas Mangrove. *Nas Media Pustaka*, Makassar. 51 hlm.
- Dharmawan, I.W.E., dan Pramudji. 2020. Mangrove community structure in Papuan Small Islands, Case Study in Biak Regency. *Proceeding The IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Purwokerto, Indonesia, 21 - 23 August 2019. 8 hlm.
- Dharmawan, I.W.E., Suyarso, Ulumuddin Y.I., Prayudha B., Pramudji. 2020. Panduan Monitoring Struktur Komunitas Mangrove di Indonesia. COREMAP CTI, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jakarta. 94 hlm.
- Dharmawan, I.W.E., T.A. Hadi, Ucu, Y.A., Petrus, C.M., S. Rahmawati. 2020. Monitoring Kesehatan Terumbu Karang dan Ekosistem Terkait di Kabupaten Biak-Numfor Tahun 2020. Pusat Penelitian Oceanografi, Kedepujian Bidang Ilmu Pengetahuan Kebumihan, LIPI. 207 hlm.
- Flowers, T.J., dan Colmer, T.D. 2015. Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. *Annals of Botany*. 115 (3): 327–331.
- Garcias-Bonet, N., dan C.M. Duarte. 2017. Methane Production by Seagrass Ecosystems in the Red Sea. *Frontiers in Marine Science*, 4(340): 1-10.
- Hall, S.J., W.H. McDowell., Whendee, L.S. When Wet Gets Wetter: Decoupling of Moisture, Redox Biogeochemistry, and Greenhouse Gas Fluxes in a Humid Tropical Forest Soil. *Ecosystems*, 16: 576-589.
- Hermawan. AR., Pribadi R., Ario R. 2014. Struktur dan Komposisi Vegetasi Mangrove Alami di Kawasan Ekowisata Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. *Journal of Marine Research*, 3(4): 405-414.
- Hidayatullah, M., E. Pujiono. 2014. Struktur dan Komposisi Jenis Hutan Mangrove di Golo Sepang Kecamatan Bolong Kabupaten Manggarai Barat. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 3(2): 151-162.
- Huang, X., X. Wang., X. Li., K. Xin., Z. Yan., Y. Sun., Richard, B. 2018. Distribution Pattern and Influencing Factors for Soil Organic Carbon (SOC) in Mangrove Communities at Dongzhaigang, China. *Journal of Coastal Research*, 34(2): 434-442.

- Irwansah, Sugiyarto, Edwi, M. 2019. Struktur Komunitas Ekosistem Mangrove di Teluk Serewe Pulau Lombok Nusa Tenggara Barat. *Bioeksperimen*, 5(2): 126-130.
- Jørgensen, J.C., Jacob, M., Karsten, F., J.R. Christiansen. 2019. Continuous methane concentration measurements at the Greenland Ice Sheet-atmosphere interface using a low-cost low-power metal oxide sensor system. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13: 3319-3328.
- Koebisch, F., S. Glatzel, G. Jurasinski. 2013. Vegetation controls methane emissions in a coastal brackish fen, *Wetlands Ecology and Management*, 21(5): 323-337.
- Lekphet, S., S. Nitorisavut., S. Adsavakulchai. 2005. Estimating methane emissions from mangrove area in Ranong Province, Thailand. *Songklanakarin Journal Science Technology*, 27(1) : 153-163.
- Lin, C.W., Yu-Chen, K., Meng-Chou, C., Hsin-Hsun, W., Chuan-Wen, H., Hsing-Juh, L. 2020. Methane Emissions from Subtropical and Tropical Mangrove Ecosystems in Taiwan. *Forests*, 11(470): 1-16.
- Lofton, D.D., S.C. Whalen, A.E. Hershey. 2014. Effect of temperature on methane dynamics and evaluation of methane oxidation kinetics in shallow Arctic Alaskan lakes, *Hydrobiologia*, 721(1): 209-222.
- Lugina, M., I. Alviya, Indartik, Mirna, A.P. 2017. Strategi Keberlanjutan Pengelolaan Hutan Mangrove di TAHURA Ngurah Rai Bali. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan*, 14(1): 61-77.
- Lugo, A., dan S. Snedaker. 1974. *The Ecology of Mangroves. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 5 : 39-64.
- Mahasani, I.G.A.I., Hendrawan, I.G., Karang, I.W.G.A. 2016. Karbon Organik di Bawah Permukaan Tanah pada Kawasan Rehabilitasi Hutan Mangrove, Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. *Prosiding Seminar Nasional Kelautan*, Universitas Trunojoyo Madura, 27 Juli 2016. 33-42 hlm.
- Mangrove Information Centre. 2004. *Pengertian Dasar Mangrove (Bakau). The Development of Sustainable Mangrove Management Project*. Bali: Ministry of Forestry and Estate Crops and JICA.
- Marín-Muñiz, J.L., Hernández, M.E., Moreno-Casasola, P. 2015. Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz Mexico: effect of plant community and seasonal dynamics. *Atmospheric Environment*, 107(26): 107-117.
- Marinho, C.C., Campos, E.A., Guimaraes, J.R.D., Esteves, F.A. 2012. Effect of Sediment Composition on Methane Concentration and Production in the Transition Zone of a Mangrove Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 72(3): 429-436.
- Masson, N., Piedrahita, R. Hannigan, M. 2015. Approach for quantification of metal oxide type semiconductor gas sensors used for ambient air quality monitoring. *Sensors Actuators B Chem*, 208: 339-345.
- Matatula, J., Enry, P., S. Pudyatmoko., R. Sadono. 2019. Keragaman Kondisi Salinitas Pada Lingkungan Tempat Tumbuh Mangrove di Teluk Kupang, NTT. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3): 425-434.
- Matthias, K. 2015. *Introduction to Statistical Analysis with R*. Bookboon.com, 228 hlm.
- Megonigal, J.P., M.E. Hines., P.T. Visscher. 2013. Anaerobic Metabolism: Linkages to Trace Gases and Aerobic Processes. *Treatise on Geochemistry: Second Edition*, 10: 273-359.
- Mustafa, A., Rachmansyah., Kamariah. 2011. Karakteristik Tanah di Bawah Tegakan Jenis Vegetasi Mangrove dan Kedalaman Tanah Berbeda Sebagai Indikator Biologi untuk Tanah Tambak di Kabupaten Mamuju Provinsi Sulawesi Barat. *Jurnal Riset Akuakultur*, 6(1): 139-156.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon., W. Collins., J. Fuglestedt., J. Huang, D. Koch., J.-F. Lamarque., D. Lee., B. Mendoza., T. Nakajima., A. Robock., G. Stephens., T. Takemura., H. Zhang. 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 203 hlm.
- Noor, Y.R., Khazali, M., Suryadiputra, I.N.N. 2006. *Panduan Pengenaln Mangrove di Indonesia*. Bogor: Wetlands International. 110 hlm.
- Nurdiansah, D., dan Dharmawan, I.W.E. 2021. Struktur Komunitas dan Kondisi Kesehatan Mangrove di Pulau Middleburg-Miossu, Papua Barat. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(1): 81-96.
- Padhy, S.R., P. Bhattacharyya, P.K. Dash, C.S. Reddy, A. Chakraborty, H. Pathak. 2020. Seasonal fluctuation in three mode of greenhouse gases emission in relation to soil labile carbon pools in degraded mangrove Sundarban, India. *Science of The Total Environment*, 705:135909.
- Patrice, P.N.I.K., Kawilarang, W.A.M., M. Iwata, Fransisco, P.T.P., Ixchel, F.M. 2012. Profil Salinitas dan Suhu di Teluk Manado pada Hari-Hari Hujan dan Tidak Hujan. *Jurnal Perikanan dan Kelautan Tropis*, 8(3): 90-93.
- Parmadi, E.H.J.C., I. Dewiyanti, Sofyatuddin, K. 2016. Indeks Nilai Penting Vegetasi Mangrove di Kawasan Kuala Idi, Kabupaten Aceh Timur. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Kelautan dan Perikanan Unsyiah*, 1(1): 82-95.
- Pepper, I.L., dan M.L. Brusseau. 2019. Physical-Chemical Characteristics of Soils and the Subsurface. *Environmental and Pollution Science*, 9-22.
- Pillai, N.G., dan Harilal, C.C. 2016. Surveillance of the Tolerance Limit of *Sonneria alba* Sm. to certain Hydrogeochemical Parameters from Heterogenous Natural Habitats of Kerala, South India. *International Research Journal of Biological Science*, 5(12): 28-37.
- Poedjirahajoe, E., D. Marsono, Frita, K.W. Penggunaan Principal Component Analysis dalam Distribusi Spasial Vegetasi Mangrove di Pantai Utara Pematang. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 11: 29-42.
- Prayitno, B. 2016. Methane Formation in Mangrove Sediment. *Oseana*, 41(3): 44-53.
- Prinasti, N.K.D., Dharma, I.G.B.S., Suteja, Y. 2020. Struktur Komunitas Vegetasi Mangrove Berdasarkan Karakteristik Substrat di Taman Hutan Raya Ngurah Rai, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Science*, 6(1): 90-99.
- Purvaja, R., R. Ramesh., P. Frenzel. 2004. Plant-mediated methane emission from an Indian mangrove, *Global Change Biology*, 10(11): 1825-1834.
- Reay, D.S., Smith, P., Christensen, T.R., James, R.H., Clark, H. 2018. Methane and Global Environmental Change. *Annual Review of Environment and Resources*, 43: 8.1-8.28.
- Rudianto, R., D.G. Bengen., F. Kurniawan. 2020. Causes and Effects of Mangrove Ecosystem Damage on Carbon

- Stocks and Absorption in East Java, Indonesia. *Sustainability*, 12: 1-17.
- Sasauw, J., Janny, D.K., Joshian, N.W.S. 2016. Struktur Komunitas Mangrove di Kelurahan Tongkaina Manado. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 2(1): 17-22.
- Sohn, J. H., Atzeni, M., Zeller, L. Pioggia, G. 2008. Characterisation of humidity dependence of a metal oxide semiconductor sensor array using partial least squares. *Sensors Actuators B Chem*, 131(1): 230-235.
- Surinati, D., dan C. Corvianawatie. Dinamika Massa Air di Sekitar Pulau-Pulau Kecil Terluar (PPKT) Perairan Utara Papua. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 4(3): 187-203.
- Susiana. 2015. Analisis Kualitas Air Ekosistem Mangrove di Estuari Perancak, Bali. *Jurnal Ilmiah agribisnis dan Perikanan*, 8(1): 42-49.
- Ulumuddin, Y.I. 2018. Metana: Emisi Gas Rumah Kaca dari Ekosistem Karbon Biru, Mangrove. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2): 359-372.
- Von-Arx, G., Elisabeth, G.P., Anne, T., M. Rebetetz. 2013. Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *Journal of Ecology*, 101: 1201-1213.
- Yusuf, H., dan F.F. Muhsoni. Struktur Komunitas, Tutupan dan Kualitas Air Mangrove di Kawasan Pesisir Kecamatan Kwanyar Kabupaten Bangkalan. *Juvenil*, 1(3): 359-370.
- Zhai, J., J. Zou., Q. He., K. Ning., H. Xiao. 2012. Variation of dissolved oxygen and redox potential and their correlation with microbial population along a novel horizontal subsurface flow wetland. *Environmental Technology*, 33(17): 1999-2006.
- Zhang, Y., F.P. Liang, Y.Y.W., Li, J.W., Zhang, S.J., Zhang, H., Bai, Q., Liu, C.Y.R., C.R. Zhong, L. Li. 2018. Allelopathic effects of leachates from two alien mangrove species, *Sonneratia apetala* and *Laguncularia racemosa* on seed germination, seedling growth and antioxidative activity of a native mangrove species *Sonneratia caseolaris*. *Allelopathy J.*, 44(1): 119-130.
- Zheng, X., Guo, J., Song, W., Feng, J., Lin, G. 2018. Methane Emission from Mangrove Wetland Soils Is Marginal but Can Be Stimulated Significantly by Anthropogenic Activities. *Forests*, 9(12): 738.