

Optimisasi Budidaya Rumput Laut sebagai Benteng Alami untuk Mengurangi Asidifikasi Laut

Moch Altof Maulana¹, Firra Rosariawari^{2*}

^{1,2}*Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

Email: ¹altofmaulana@gmail.com, ^{2*}firra.tl@upnjatim.ac.id

Abstract

Anthropogenic carbon dioxide emissions are propelling a concerning rise in ocean acidity, posing severe threats to marine ecosystems, especially calcifying organisms like corals and mollusks. In response to this global challenge, seaweed farming has emerged as a promising remedy. Leveraging their remarkable growth rates and carbon sequestration abilities, seaweeds offer a viable solution to counteract the acidifying effects of elevated carbon dioxide levels in the oceans. Through photosynthesis, seaweeds actively absorb carbon dioxide from seawater, thereby mitigating acidity and fostering improved water quality. The potential of seaweed farms extends beyond mere carbon sequestration. These farms play a pivotal role in habitat creation, absorb nitrogen and phosphorus nutrients, and contribute to enhanced biodiversity. The cultivation of seaweed not only addresses the immediate concern of ocean acidification but also provides a holistic ecological approach with far-reaching benefits. As a sustainable and scalable strategy, seaweed farming exemplifies an innovative and multifaceted solution to the complex challenges posed by anthropogenic impacts on the oceans, underlining the importance of nature-based interventions in preserving the health and balance of marine ecosystems.

Keywords: Seaweeds, Carbon Dioxide, Acidity.

Abstrak

Dengan terus meningkatnya emisi karbon dioksida antropogenik, laut menghadapi tantangan serius dalam bentuk peningkatan keasaman yang dikenal sebagai pengasaman laut. Fenomena ini menimbulkan ancaman besar terutama bagi ekosistem laut yang bergantung pada organisme pengapuran seperti karang, moluska, dan beberapa jenis plankton. Sebagai respons terhadap masalah global ini, budidaya rumput laut muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Rumput laut, dengan pertumbuhannya yang cepat dan kemampuannya menyerap karbon, memegang peran kunci dalam meningkatkan kualitas air dan mengurangi dampak keasaman akibat peningkatan karbon dioksida. Potensi budi daya rumput laut tidak hanya terbatas pada pengurangan keasaman laut. Budidaya ini juga menciptakan habitat, menyerap nutrisi nitrogen dan fosfor, serta mendukung keanekaragaman hayati. Sebagai strategi yang berkelanjutan dan dapat ditingkatkan, budidaya rumput laut menunjukkan potensi besar dalam mitigasi pengasaman laut. Melalui aktivitas fotosintesinya, rumput laut secara efektif menyerap karbon dioksida dari air laut, mengurangi tingkat keasamannya. Inisiatif ini bukan hanya sebagai solusi jangka pendek terhadap pengasaman laut, tetapi juga sebagai pendekatan ekologis yang menyeluruh dengan manfaat yang luas untuk menjaga kesehatan ekosistem laut.

Kata Kunci: Rumput Laut, Karbon Dioksida, Keasaman.

1. PENDAHULUAN

Kenaikan Tingkat karbon dioksida (CO_2) dalam atmosfer, terutama akibat bahan bakar fosil menyebabkan penurunan pH dan karakteristik kimia karbonat dalam air laut. Proses Asidifikasi telah tercatat di lapangan mengalami peningkatan secara drastis dalam abad ini, ada kemungkinan untuk mengalami penurunan yang signifikan jika mengikuti langkah-langkah untuk membatasi emisi CO_2 . Dampak nyatanya dapat dilihat pada

penurunan kadar saturasi kalsium karbonan (CaCO_3), yang dibutuhkan oleh hewan-hewan bercangkang dan terumbu karang di laut (Doney et al., 2009).

Upaya utama dalam menanggulangi asidifikasi laut hampir sama dengan penanggulangan perubahan iklim, dengan mengurangi jumlah emisi rumah kaca. Berbeda dengan pemanasan global, asidifikasi laut dapat diatasi secara lokal, melalui aktifitas fotosintesis makrofita yang terendam dimana tumbuhan autotofik mengikat CO_2 berlebih dan menjaga kadar pH relative (Duarte et al., 2013). Oleh karena itu keberadaan padang rumput laut sering menjadi perdebatan sebagai lokasi barrier untuk mencegah asidifikasi laut. Meskipun perlindungannya terbatas pada daerah budidaya makrofit, namun budidaya rumput laut ini mampu memberikan zona perlindungan di wilayah yang susah dijangkau oleh makrofit liar. Karena itu budidaya rumput laut diusulkan sebagai metoda untuk melindungi ekosistem laut dari dampak asidifikasi (Duarte et al., 2017).

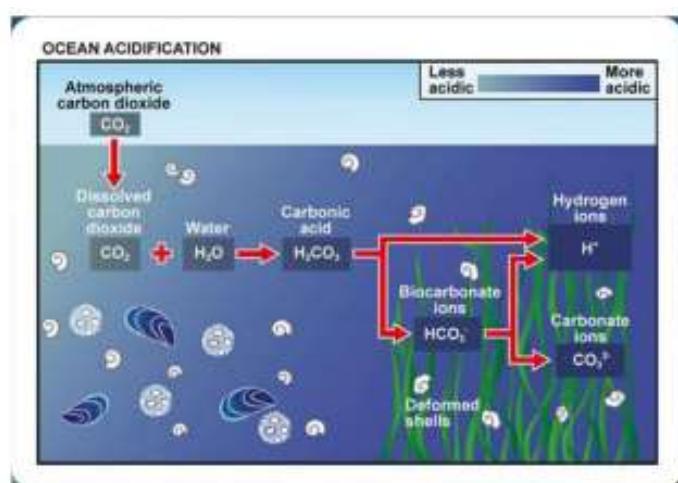
Pada penelitian sebelumnya, tercatat peningkatan kadar pH dalam rentang 0,14 hingga 0,3. Saat dilakukan pemantauan, fluktuasi intensif mungkin membantu organisme laut untuk beradaptasi dengan peningkatan pH yang mungkin terjadi di masa depan. Pengurangan kadar pCO_2 didalam area budidaya dengan area kontrol sekitar $58.7 \pm 15.9 \mu\text{atm}$, kadar Qaragonite dan Qcalcite (Xiao et al., 2021). Asidifikasi laut terjadi ketika laut terlalu banyak menyerap gas-gas CO_2 dari udara, sebagian besar berasal dari aktifitas manusia yang berada di daerah pesisir. Mengakibatkan penurunan kadar pH dipermukaan air laut (Caldeira K & Wickett ME., 2003). Hal ini menyebabkan penurunan kadar CO_3^{2-} yang menyebabkan tingkat saturasi mineral (Ω) CaCO_3 menurun (Duarte et al., 2013).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Penelitian Pendahuluan

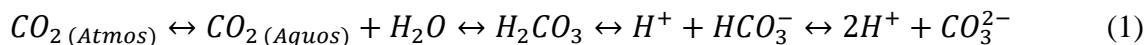
Air laut memiliki pH sebesar 8,4 namun pada 250 tahun terakhir tingkar kadar CO_2 telah meningkat sebesar 40% dari sekitar 280 ppmv (*Part Per Million Volume*) menjadi 384 ppmv pada tahun 2007 dan terjadi penurunan kadar pH dari 8,2 menjadi 8,14 (Doney et al., 2009). pH dilautan akan terus mengalami penurunan sebesar 0,3 hingga 0,4 jika kadar CO_2 di atmosfer mencapai 800 ppmv (Orr et al., 2005). Dalam asidifikasi laut terjadi karena penyerapan kadar CO_2 berlebih dari atmosfer dikarenakan peningkatan penghasil gas CO_2 , dan ada beberapa sektor yang menjadi penghasil gas CO_2 yaitu : Sektor Energi, Sektor Proses Industri dan Penggunaan Produk, dan Sektor Limbah (Indrawanto., 2022).

Reaksi dalam siklus karbon dilaut seperti berikut:



Gambar 1 Ilustrasi Siklus Karbon
Sumber : National Oceanographic, 2021

Ilustrasi diatas dapat dituliskan dalam rumus sebagai berikut :



Pertukaran gas yang berlangsung di udara dan air laut menyeimbangkan kadar CO₂ di permukaan air laut ke tingkat atmosfer bumi dengan skala rentang waktu sekitar satu tahun. Ketika gas CO₂ sudah terlarut di dalam air laut maka akan bereaksi dengan air (H₂O) menjadi asam karbonat (H₂CO₃) yang dapat memisahkan diri dengan kehilangan ion Hidrogen (H⁺) dan berubah menjadi ion bikarbonat (HCO₃⁻) dan ion karbonat (CO₃²⁻). Reaksi yang terjadi di air laut dapat dikembalikan menjadi senyawa yang sebelum terjadi reaksi-reaksi kimianya dan reaksi ini hampir seimbang (Bertuzzi et al., 2006).

2.2 Penelitian Utama

Menentukan luasan Menentukan beberapa luasan area penelitian untuk dapat mengetahui keefektifan efek dari rumput laut tersebut terhadap daerah pesisir maupun daerah laut. Jarak yang di ambil adalah seluas : 1 km, 1,5 km, dan 2 km. Pengambilan sampel dilakukan dengan melakukan pengambilan sample air sebanyak 500 ml yang sesuai dengan (SNI 6964.8 2015) di ketiga titik sampling, yaitu titik pusat budaya, titik pesisir, dan titik di arah laut lepas.

Pengukuran pCO₂ Pertama harus mencari kadar DIC (Dissolved Inorganic Carbon) yang didapatkan dari kadar terlarut CO₂ dan kadar ion ion karbotnat dan bikarbonat, lalu data-data tersebut akan dimasukan kedalam aplikasi <https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/carbonate/> dari *Colorado University*, data yang dimasukan adalah suhu, total alkalinitas dan DIC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Hasil Uji Sample Air Laut

Lokasi	Parameter	Kode Lokasi		
		Titik Budidaya	Titik Sampling 2	Titik Sampling 1
Karang Hitam (gracilaria sp)	pH	8,041	7,822	8,031
	Salinitas	34,78 permil	34,78 permil	34,78 permil
	PCO ₂	382,3 ppmv	657,4 ppmv	391,9 ppmv
	ΩArag	3,2	2	3,1
	ΩCal	4,8	3	4,7
	Total Alkalinitas	60 mg/L CaCO ₃	57 mg/L CaCO ₃	63 mg/L CaCO ₃
Cemara Indah (eucheuma cottonii)	pH	8,279	7,901	8,042
	Salinitas	34,78 permil	34,78 permil	34,78 permil
	PCO ₂	205,7 ppmv	542,4 ppmv	393,1 ppmv
	ΩArag	5,1	2,4	3,3
	ΩCal	7,8	3,6	5
	Total Alkalinitas	65 mg/L CaCO ₃	58 mg/L CaCO ₃	62 mg/L CaCO ₃

Catatan : Titik Sampling 2 = Daerah Menjauhi budidaya mengarah ke laut lepas

Titik Sampling 1 = Daerah menjauhi budidaya mengarah ke pesisir Pantai

Sumber : Hasil Analisa Peneliti, 2023

Pada penelitian ini, air laut yang berada di daerah budidaya rumput laut dan area sekitarnya menjadi sorotan dalam penelitian untuk melihat efisiensi untuk mengurangi kadar pCO₂ dan kadar kenaikan pH. Dapat dilihat pada tabel 1 bahwa hasil yang didapatkan menyatakan kadar pH didaerah budidaya lebih tinggi dari pada daerah yang

menjauhi dari budidaya tersebut dengan perbedaan yang paling besar terdapat pada daerah Pantai Cemara Indah 0,3 dan perubahan yang paling kecil berada pada Pantai Karang Hitam dengan selisih sebesar 0,01. Dari kadar pCO_2 dapat dilihat bahwa ada berhubungan dengan kadar pH serta pengurangan pada kadar pCO_2 nya sendiri pada daerah tempat budidaya maka kadar pCO_2 nya juga tidak terlalu banyak di bandingkan dengan area yang tidak terjangkau dengan budidaya rumput laut tersebut. Dan jumlah kadar saturasi dari *aragonite* dan *calcite* ($\Omega Arag$ & ΩCal) juga lebih tinggi didaerah budidaya.

Dari hasil penelitian, terlihat adanya perubahan yang konsisten dalam parameter sistem karbon di wilayah perairan budidaya rumput laut tersebut, yang disebabkan oleh hasil fotosintesis dari rumput laut. pH, ΩCal , dan $\Omega Arag$ menunjukkan peningkatan di dalam wilayah budidaya, sementara kadar pCO_2 mengalami penurunan sebanding. Selain itu, terdapat perbedaan dalam jenis rumput laut yang digunakan, di mana *Eucheuma Cottonii* menunjukkan tingkat serapan karbon dan fotosintesis yang lebih tinggi daripada *Gracilaria sp*, seperti yang terlihat pada perbedaan kadar pCO_2 .

Hasil dari penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya, yang menunjukkan bahwa kadar pCO_2 dalam budidaya rumput laut lebih rendah daripada di daerah laut lepas (Jiang et al., 2013). Hasil ini membuktikan bahwa budidaya rumput laut berperan sebagai tempat penyerapan CO_2 , sehingga dapat berperan sebagai barrier dalam mengurangi kadar asidifikasi laut sekitar 0,017-0,027 unit setiap 10 tahun sejak tahun 1980-an (Duarte et al., 2017), (IPCC, 2019). Organisme yang melakukan proses pengapuran seperti kerang-kerangan termasuk salah satu makhluk hidup yang terdampak oleh asidifikasi laut (Kroeker et al., 2013) dapat merasakan manfaat dari efek barrier tersebut.

Tabel 2. Hasil Analisa DIC

Lokasi	Parameter	Kode Lokasi		
		Titik Budidaya	Titik Sampling 2	Titik Sampling 1
Karang Hitam (gracilaria sp)	pH	8,041	7,822	8,031
	CO_2	10,83 uMol/Kg	18,63 uMol/Kg	11,1 uMol/Kg
	HCO_3^-	1689 uMol/Kg	1756 uMol/Kg	1693 uMol/Kg
	CO_3^{2-}	199,8 uMol/Kg	125,5 uMol/Kg	195,7 uMol/Kg
Cemara Indah (eucheuma cottonii)	pH	8,279	7,901	8,042
	CO_2	5,827 uMol/Kg	15,37 uMol/Kg	11,14 uMol/Kg
	HCO_3^-	1572 uMol/Kg	1736 uMol/Kg	1743 uMol/Kg
	CO_3^{2-}	321,7 uMol/Kg	148,7 uMol/Kg	206,8 uMol/Kg

Catatan : Titik Sampling 2 = Daerah Menjahui budidaya mengarah ke laut lepas

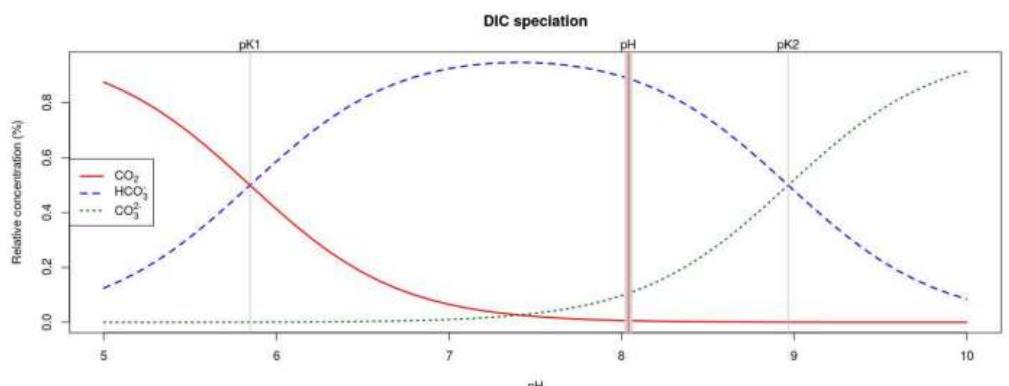
Titik Sampling 1 = Daerah menjahui budidaya mengarah ke pesisir Pantai

Sumber : Hasil Analisa Penelitian, 2023

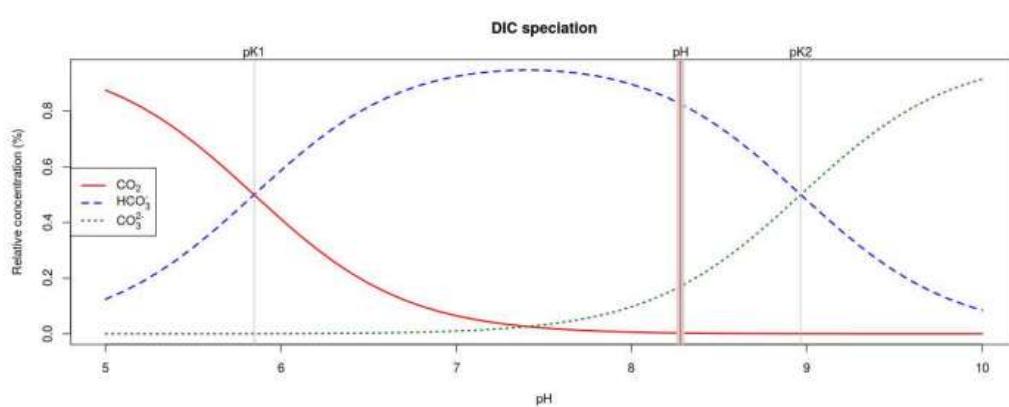
Dari tabel 2 terlihat bahwa nilai pH memiliki pengaruh signifikan pada senyawa-senyawa yang membentuk DIC (*Dissolved Inorganic Carbon*). Semakin besar nilai pH, semakin rendah konsentrasi CO_2 terlarut dan semakin tinggi konsentrasi CO_3^{2-} , namun pola ini berbeda untuk HCO_3^- yang mencapai titik tertinggi pada nilai pH antara 7 dan 8.

Pada gambar 2 terlihat bahwa ketika pH berada di bawah 8, seperti pada titik sampling 2 di Pantai Karang Hitam, nilai CO_2 lebih tinggi dibandingkan dengan titik budidaya dan titik sampling 1. Nilai CO_2 mencapai 18,63 pada titik sampling 2, sedangkan pada titik budidaya dan titik sampling 1, nilai masing-masing adalah 10,83 dan 11,1. Nilai HCO_3^- cenderung lebih tinggi dalam rentang pH 7-8, dan lebih rendah di bawah 7 dan di atas 8, seperti yang terlihat pada Pantai Cemara Indah pada titik sampling 2 dan 1. Meskipun tidak terjadi perubahan yang signifikan pada pH 7,9 dan 8,04, penurunan yang signifikan terjadi pada pH 8,279. Dalam hal nilai CO_3^{2-} , semakin tinggi

nilai pH, semakin tinggi pula nilai senyawa ini. Peningkatan drastis terlihat pada pH melebihi 8, terlihat pada Pantai Karang Hitam pada titik Sampling 2, yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan dengan titik budidaya dan titik sampling 1. Pada titik sampling 2, nilai CO_3^{2-} sebesar 125,5, sementara pada titik budidaya dan titik sampling 1, nilainya masing-masing adalah 199,8 dan 195,7. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai pH, nilai senyawa pada DIC akan mengalami perubahan sesuai dengan reaksi pada rumus (1).



DIC Pada Pantai Karang Hitam Kode A



DIC Pada Pantai Cemara Indah Kode A

Gambar 2. Hasil Dari Perhitungan DIC dan pCO₂ dari tempat budidaya
Sumber : <https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/carbonate/>

Dibandingkan dengan air laut yang tidak mengalami budidaya rumput laut, pH dalam wilayah budidaya rumput laut menunjukkan peningkatan dalam rentang 0,01 hingga 0,3. Ketika terjadi peningkatan pH sebesar 0,1 dari rentang pH 7,8 menjadi 7,9, proses kalsifikasi pada kerang dapat meningkat sebesar 13,5% (Wahl et al., 2018). Menurut IPCC, pengurangan pH dapat mencapai 0,065 pada akhir tahun 2100 dalam skenario terburuk. Oleh karena itu, peningkatan pH yang dihasilkan oleh budidaya rumput laut dianggap sebagai solusi yang dapat mencegah penurunan pH di masa depan, terutama dalam konteks tingkat emisi yang tinggi. Hasil penelitian dari budidaya di Pantai Cemara Indah menunjukkan kemampuan untuk menyeimbangkan kadar pH di area sekitar laut, dan pertumbuhan pesat rumput laut dapat mengurangi kadar pCO₂ (Krause Jensen., 2016), dan secara bergantian akan merubah kadar CO₂ yang berlebih yang akan membuat sebagai barrier untuk makhluk hidup laut untuk mencegah dari asidifikasi laut.

Tabel 3. Hasil Hubungan antara Titik Budidaya dan Titik Laut Lepas

Lokasi	Parameter	Kode Lokasi	
		Titik Budidaya	Titik Sampling 2
Karang Hitam (<i>gracilaria sp</i>)	pH	8,041	7,822
	PCO ₂	382,3 ppmv	657,4 ppmv
	ΩArag	3,2	2
	ΩCal	4,8	3
Cemara Indah (<i>eucheuma cottonii</i>)	pH	8,279	7,901
	PCO ₂	205,7 ppmv	542,4 ppmv
	ΩArag	5,1	2,4
	ΩCal	7,8	3,6

Catatan : Titik Sampling 2 = Daerah Menjauhi budidaya mengarah ke laut lepas

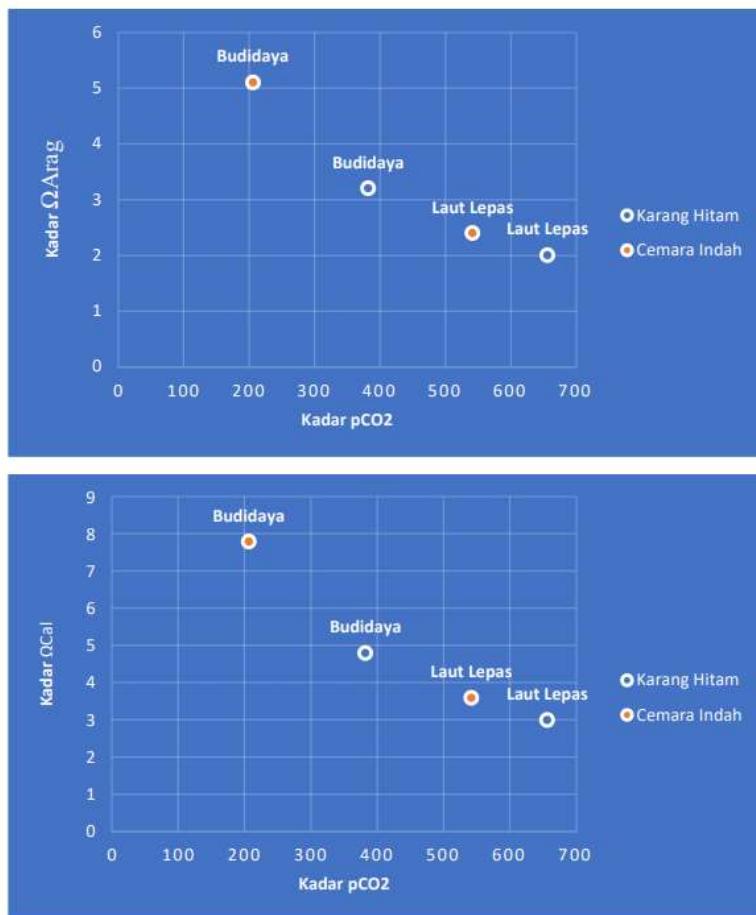
Sumber : Hasil dari Penelitian, 2023

Pada tabel 3, terlihat hubungan antara kenaikan kadar pCO₂ dengan pH, ΩCal, dan ΩArag, dimana semakin tinggi kadar pCO₂, maka pH, ΩCal, dan ΩArag akan mengalami penurunan. Pada Pantai Karang Hitam, ketika pCO₂ pada titik budidaya mencapai 382,3, nilai pH, ΩCal, dan ΩArag masing-masing adalah 8,041; 4,8; dan 3,2, dan mengalami peningkatan pada titik sampling 2 dengan kadar pCO₂ 657,4, dengan nilai pH, ΩCal, dan ΩArag masing-masing menjadi 7,82; 3; dan 2. Pola yang sama terjadi pada Pantai Cemara Indah, di mana pCO₂ pada titik budidaya sebesar 205,7, dengan nilai pH, ΩCal, dan ΩArag masing-masing adalah 8,279; 7,8; dan 5,1, dan mengalami peningkatan pada titik sampling 2 dengan kadar pCO₂ 542,4, dengan nilai pH, ΩCal, dan ΩArag masing-masing menjadi 7,901; 3,6; dan 2,4.

Dalam budidaya rumput laut, terlihat peningkatan pada kadar ΩCal dan ΩArag, dengan rata-rata kenaikan pada ΩArag sebesar 1,95 dan pada ΩCal sebesar 3. Peningkatan ini konsisten dengan peningkatan kadar pH. Budidaya rumput laut di daerah Cemara Indah menunjukkan peningkatan kadar saturasi *calcite* dan *aragonite* sebesar 2,7 dan 4,2, dan memiliki kadar pCO₂ di laut lepas yang lebih rendah daripada di daerah Karang Hitam, disebabkan oleh tingkat polusi udara yang lebih rendah di daerah Cemara Indah yang lebih jauh dari produksi pembangkit listrik tenaga gas dan uap.

Hasil penelitian ini memberikan dukungan kuat pada hipotesa awal bahwa budidaya rumput laut memiliki kapasitas untuk mengurangi kadar CO₂, meningkatkan kadar pH, serta meningkatkan kadar saturasi *aragonite* dan *calcite* dalam skala lokal. Dengan potensi yang dapat disesuaikan sesuai dengan skala yang diinginkan, penelitian ini mendukung peran budidaya rumput laut sebagai *barrier* untuk melindungi kehidupan laut di masa depan, dengan kapasitas yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan daerah laut yang mengalami asidifikasi laut.





Gambar 3. Pengaruh dari Rumput Laut Terhadap Sistem Karbon di Air Laut
Sumber : Hasil dari Peneliti, 2023

4. KESIMPULAN

Dari kedua jenis rumput laut di Pantai Karang Hitam (*Gracilaria sp*) dan Pantai Cemara Indah (*Eucheuma cottonii*), terlihat bahwa Pantai Cemara Indah memiliki keefektifan yang lebih tinggi dengan peningkatan kadar pH, ΩCal , dan $\Omega Arag$, serta penurunan pCO_2 masing-masing sebesar 0,389, 4,2, 2,7, dan 336,7, dibandingkan dengan Pantai Karang Hitam yang memiliki peningkatan kadar pH, ΩCal , dan $\Omega Arag$, dan penurunan pCO_2 masing-masing sebesar 0,219, 1,8, 1,2, dan 275,1.

Pantai Cemara Indah menunjukkan peningkatan kadar pH, ΩCal , dan $\Omega Arag$, serta penurunan pCO_2 yang lebih tinggi daripada di Pantai Karang Hitam. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan jenis rumput laut yang digunakan, di mana *Eucheuma Cottonii* memiliki kemampuan serap karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan *Gracilaria sp*.

\

REFERENCES

- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). "Ocean acidification: The other CO₂ problem." *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>.
- Duarte, C. M., Hendriks, I. E., Moore, T. S., Olsen, Y. S., Steckbauer, A., Ramajo, L., Carstensen, J., Trotter, J. A., & McCulloch, M. (2013). "Is Ocean Acidification an Open Ocean Syndrome? Understanding Anthropogenic Impacts on Seawater pH." *Estuaries and Coasts*, 36(2), 221–236. <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9594-3>.

- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017). "Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?" *Frontiers in Marine Science*, 4(APR). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00100>.
- Xiao, X., Agustí, S., Yu, Y., Huang, Y., Chen, W., Hu, J., Li, C., Li, K., Wei, F., Lu, Y., Xu, C., Chen, Z., Liu, S., Zeng, J., Wu, J., & Duarte, C. M. (2021). "Seaweed farms provide refugia from ocean acidification." *Science of the Total Environment*, 776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145192>.
- Caldeira K, & Wickett ME. (2003). "Anthropogenic carbon and ocean {pH}." *Nature*, 425(September), 365.
- Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., Feely, R. A., Gnanadesikan, A., Gruber, N., Ishida, A., Joos, F., Key, R. M., Lindsay, K., Maier-Reimer, E., Matear, R., Monfray, P., Mouchet, A., Najjar, R. G., Plattner, G.-K., Rodgers, K. B., ... Yool, A. (2005). "Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms." *Nature*, 437(7059), 681–686. <https://doi.org/10.1038/nature04095>.
- Indrawanto, M. S., Studi, P., Lingkungan, T., & Teknik, F. (2022). "TINGKAT KEANEKARAGAMAN BVEGETASI MANGROVE DENGAN PRIMER 7 TERHADAP EMISI GAS RUMAH KACA CO 2 SEKTOR TINGKAT KEANEKARAGAMAN BVEGETASI MANGROVE DENGAN PRIMER 7 TERHADAP EMISI GAS RUMAH KACA CO 2 SEKTOR."
- Bertuzzi, M. A., Armada, M., & Gottifredi, J. C. (2006). "Caracterizacion fisico-quimica de soluciones de goma brea." XXII Interamerican Congress of Chemical Engineering, CIIQ 2006 and V Argentinian Congress of Chemical Engineering, CAIQ 2006 - Innovation and Management for Sustainable Development, 49, 1705–1723.
- Badan Standarisasi Nasional. 2015. SNI 6964-8-2015 Metode Pengambilan Sampel Air Laut. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Jiang, Z., Fang, J., Mao, Y., Han, T., Wang, G., 2013. "Influence of seaweed aquaculture on marine inorganic carbon dynamics and sea-air CO₂ flux." *J. World Aquacult. Soc.* 44, 133–140
- IPCC, Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., et al. (Eds.), 2019. "IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate" 2019. IPCC, pp. 9–46.
- Kroeker, K.J., Kordas, R.L., Crim, R., Hendriks, I.E., Ramajo, L., Singh, G.S., et al., 2013. "Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and inter-action with warming". *Glob. Change Biol.* 19, 1884–1896.
- Wahl, M., Schneider Covachă, S., Saderne, V., Hiebenthal, C., Müller, J.D., Pansch, C., et al., 2018. "Macroalgae may mitigate ocean acidification effects on mussel calcification by increasing pH and its fluctuations." *Limnol. Oceanogr.* 63, 3–21.
- Krause-Jensen, D., Marbà, N., Sanz-Martin, M., Hendriks, I.E., Thyrring, J., Carstensen, J., et al., 2016. "Long photoperiods sustain high pH in arctic kelp forests." *Sci. Adv.* 2, e1501938.
- Gattuso, J. P., Magnan, A. K., Bopp, L., Cheung, W. W. L., Duarte, C. M., Hinkel, J., Mcleod, E., Micheli, F., Oschlies, A., Williamson, P., Billé, R., Chalastani, V. I., Gates, R. D., Irisson, J. O., Middelburg, J. J., Pörtner, H. O., & Rau, G. H. (2018). "Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems." *Frontiers in Marine Science*, 5(OCT). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337>.