

## Kajian Komparatif Tentang Korosi pada Point-Absorber dan Pelamis dengan Analisis Kontekstual di Indonesia

Vedora Aprillia Salsabila<sup>1\*</sup>, Sovian Aritonang<sup>2</sup>

<sup>1,2)</sup> Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

\*Email: vedoraaprillia567@gmail.com

### ABSTRACT

*Global energy demand is rising while fossil fuel reserves are declining, underscoring the need for renewable energy. Ocean wave energy, with a potential of around 2 TW, is a promising alternative, yet the corrosive marine environment challenges the durability of Wave Energy Converters (WEC). This study uses a Systematic Literature Review (SLR) to compare the corrosion resistance of two WEC types, Point-Absorber and Pelamis, and assess their suitability for Indonesia. Results show that Point-Absorbers are prone to corrosion fatigue, whereas Pelamis devices are more vulnerable to crevice corrosion. Appropriate material selection, such as 316L stainless steel or carbon fibre composites, along with corrosion protection, is essential, and site-specific factors, such as wave potential, grid proximity, and environmental impact, must be considered for sustainable WEC deployment.*

**Keywords:** Wave Energy Converter, Corrosion, Point-Absorber, Pelamis, Renewable Energy

### PENDAHULUAN

Kebutuhan energi terus meningkat setiap hari, sementara cadangan bahan bakar fosil di alam semakin menipis. Hal ini memunculkan kekhawatiran mengenai pencarian sumber energi alternatif. Di sisi lain, pesatnya industrialisasi telah berdampak pada peningkatan emisi karbon monoksida (CO) serta berbagai gas berbahaya lainnya. Sektor industri menjadi salah satu pemakai (konsumsi) listrik paling besar di dunia yang biasanya menyumbang proporsi yang jauh lebih banyak dibanding sektor lainnya [6]. Oleh karena itu, kajian tentang berbagai sumber daya terbarukan untuk pembangkit listrik menjadi semakin relevan dan mendesak.

Akibat industrialisasi global, dunia juga mengalami peningkatan signifikan dalam fenomena pemanasan global, kebutuhan listrik juga semakin meningkat termasuk lonjakan emisi CO. Listrik dalam skala besar terciptakan oleh bahan bakar fosil seperti batu bara, gas alam, dan minyak bumi yang memiliki dampak untuk bumi [6]. Yakni seperti perubahan iklim, polusi udara, dan perubahan lingkungan. Kondisi ini menuntut perhatian lebih besar terhadap pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk menghasilkan listrik. Pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti angin, air, gelombang laut, atau energi termal matahari semakin dipandang untuk mengurangi potensi kerusakan bumi guna pemenuhan kebutuhan energi listrik. Salah satu bentuk energi terbarukan yang potensial adalah energi gelombang laut, yang diperkirakan memiliki potensi sekitar 2 TW dari total kapasitas pembangkit listrik dunia [7].

Gelombang laut terutama dihasilkan oleh perpindahan energi dari angin ke permukaan laut. Proses ini dimulai ketika angin bertiup dari atas lautan, menciptakan riakan permukaan yang berkembang menjadi gelombang [13]. Angin yang berhembus di atas lautan mendorong massa air dan mampu membawanya melintasi ribuan kilometer sebelum akhirnya sampai ke pantai. Ukuran gelombang beragam, mulai dari riak kecil hingga gelombang besar seperti tsunami, yang menyimpan energi sangat besar. Sebagian dari energi ini dapat dikonversi menjadi listrik yang bermanfaat. Pada dasarnya, energi matahari merupakan sumber utama di balik terciptanya gelombang laut. Radiasi termal matahari meningkatkan suhu udara, memicu terjadinya angin, dan pada akhirnya membentuk gelombang yang merambat di permukaan laut.

Gelombang laut memiliki variasi ukuran yang sangat lebar, mulai dari riakan kecil hingga gelombang raksasa seperti tsunami. Inilah yang membuatnya menyimpan potensi energi sangat besar, di mana sebagian darinya bisa kita ubah menjadi energi listrik. Selain gelombang laut, korosi dapat ditimbulkan karena kadar elektrolit air laut. Korosi pada perangkat WEC dapat menyebabkan kerusakan struktur dan penurunan umur layanan sistem secara signifikan [12]. Fenomena ini tidak hanya meningkatkan biaya pemeliharaan tetapi juga menurunkan keandalan serta efisiensi WEC.

Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat dan penerapan metode perlindungan korosi menjadi aspek penting dalam perancangan dan pengembangan WEC. Contoh dari WEC yaitu Point-Absorber dan Pelamis. Keduanya memiliki ketahanan dari korosi yang berbeda. Point Absorber memiliki geometri yang lebih sederhana daripada Pelamis yaitu tidak memiliki celah. Korosi celah sangat berbahaya terhadap WEC di laut karena menyebabkan kegagalan struktur secara tiba-tiba dan sulit dideteksi sehingga sangat merusak.

### METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan Tinjauan Pustaka atau pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengkaji secara komprehensif bukti-bukti terkait ketahanan korosi material pada perangkat WEC khususnya tipe Point-Absorber dan Pelamis. Metode ini dipilih karena dinilai mampu mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasi seluruh temuan yang tersedia secara transparan dan sistematis. Analisis data telah diekstraksi secara kualitatif naratif yaitu dengan membandingkan mekanisme korosi yang dominan pada setiap jenis perangkat, misalnya mengkaji kerentanan Point Absorber terhadap *corrosion fatigue* akibat siklus naik-turun yang konstan [9] atau kerentanan Pelamis terhadap *fretting corrosion* pada sambungan engselnya. Sintesis dari seluruh temuan ini pada akhirnya akan menjawab pertanyaan penelitian mengenai material paling tahan serta memberikan rekomendasi bagi pengembangan material dan sistem proteksi yang lebih andal di masa depan untuk majunya teknologi energi kelautan.

Pertanyaan Penelitian:

- a. Bagaimana perbandingan antara material Pelamis dan Point Absorber dalam segi ketahanan terhadap korosi di laut?
- b. Bagaimana kesesuaian lokasi potensial lingkungan di Indonesia akibat pemanfaatan WEC?
- c. Bagaimana korosi lokal dapat menyebabkan menurunnya daya tahan dan efisiensi dari WEC?

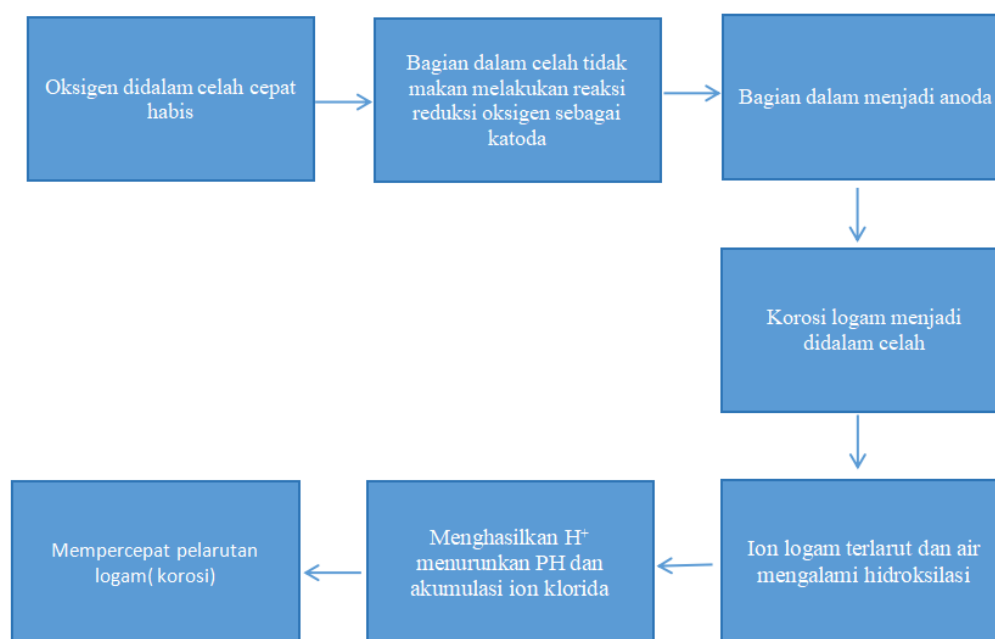
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Penyebab Utama Korosi Material WEC di Laut

Laut merupakan lingkungan yang sangat korosif akibat kandungan ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ) yang tinggi, fluktuasi suhu, keberadaan oksigen terlarut, mikroorganisme, serta dinamika gelombang, dan arus laut. Perangkat WEC seperti Point Absorber dan Pelamis, apabila terpapar secara terus menerus pada kondisi ini, akan menjadi ancaman serius terhadap keandalan, efisiensi, dan umur WEC. Beberapa mekanisme korosi yang relevan dengan WEC. Pertama, Korosi Umum yang terjadi secara merata pada permukaan logam yang terpapar air laut. Korosi Galvanik, misalnya, terjadi akibat dua logam berbeda bersentuhan dalam elektrolit (air laut) menyebabkan logam lebih aktif terkikis. Korosi Erosi disebabkan oleh gesekan terus menerus dari air laut yang mengandung partikel padat atau gelembung udara. Pada area sambungan atau baut, korosi celah menjadi risiko utama. Celah sempit sambungan atau baut dimana pertukaran oksigen terbatas, membentuk sel konsentrasi oksigen yang memicu korosi lokal yang cepat. Yang tidak kalah berbahaya adalah *Corrosion Fatigue* yaitu kombinasi dari beban siklik akibat gerakan naik turun gelombang dan lingkungan korosif yang menyebabkan retakan tumbuh lebih cepat daripada di udara.

Pada dua macam WEC memiliki ancaman pada korosi yang berbeda. Korosi celah menjadi yang paling berbahaya untuk Pelamis. Korosi celah adalah suatu bentuk korosi lokal yang terjadi di ruang terbatas antara dua permukaan logam atau dengan non logam dimana larutan elektrolit yang agresif terjebak dan akses oksigen atau sirkulasi larutan menjadi sangat terbatas [3]. Dalam lingkungan laut, akumulasi ion klorida di dalam celah sangat signifikan untuk mempercepat kerusakan lapisan pasif dan memicu korosi lokal intensif [4]. Selain itu, peningkatan suhu, kehadiran klorin, kondisi aliran, dan kondisi alami laut dalam juga mempengaruhi tingkat keparahan korosi celah [11]. Untuk perangkat WEC yang memiliki sambungan seperti Pelamis, celah antara logam dengan komponen non logam bisa menjadi lokasi ideal untuk korosi celah. Jenis material, kemampuan membentuk lapisan pasir, kondisi pelapis, serta permukaan yang telah mengalami deposit atau fouling.

Selain korosi, terdapat pula bentuk degradasi lain seperti kelelahan struktural dan keausan akibat gerakan gelombang yang dapat memperparah kerusakan material WEC [5]. Ancaman yang terjadi pada Point-Absorber yaitu *Corrosion Fatigue*. Fenomena ini terjadi akibat kegagalan material yang terjadi akibat kombinasi dua faktor yaitu beban siklik dan lingkungan korosif. Beban siklik yaitu tegangan yang berfluktuasi secara berulang akibat dari gerakan gelombang, naik-turunnya float pada Point-Absorber. Gerakan naik-turun tersebut akan menyebabkan terbentuknya retak mikro pada permukaan material. Retakan mikro apabila bereaksi dengan air laut akan lebih cepat menyebar karena air laut merupakan katalis yang ampuh untuk korosi. Pembentukan pit atau celah mikro yang kemudian menjadi titik awal keretakan. Studi review menyatakan bahwa untuk struktur kelautan kondisi korosi fatigue adalah tantangan besar [15]. Zona sambungan (welds), sambungan bolted, titik transisi geometris, sambungan elemen adalah lokasi konsentrasi tegangan yang tinggi dan sering menjadi tempat inisiasi retak. Korosi di sekitar weld atau sambungan memperburuk kondisi dan mempercepat kerusakan.

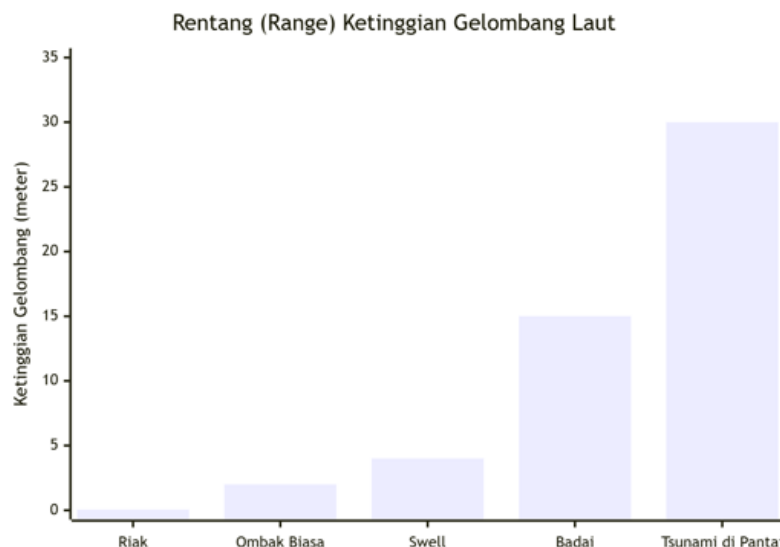


Gambar 1. Proses Terjadinya Korosi Celah pada Pelamis

Korosi pada umumnya dapat disebabkan oleh air laut. Air laut merupakan elektrolit yang agresif, dengan konsentrasi garam sekitar 3,5 % (NaCl dan ion-ion lain), menyebabkan proses elektro-kimia yang mempercepat korosi [12]. Gelombang laut menciptakan pengikisan lapisan pelindung suatu bahan WEC di bawah laut. Air laut memiliki kadar garam sebesar 3,5% yang terdiri dari campuran kompleks berbagai unsur kimia seperti ( $\text{Cl}^-$ ), Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), dan Kalsium ( $\text{K}^+$ ). Dari berbagai unsur tersebut, ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ) memiliki sifat sangat korosif dan menjadi tantangan besar bagi material WEC seperti baja karbon dan pipa, karena ukurannya yang kecil dan reaktif sehingga mampu menembus lapisan pelindung material.

#### Faktor Lain Penunjang Korosi Material WEC

Faktor-faktor lain yang memengaruhi laju korosi antara lain oksigen terlarut, pola aliran gelombang (turbulensi dan geseran), perubahan pH lokal, temperatur, residu sulfida atau klorida, biofouling (pertumbuhan organisme laut), serta korosi kavitas atau erosi akibat gelembung maupun partikel padat di laut. Pengaruh lingkungan laut terhadap korosi (termasuk ion klorida, oksigen, aliran laut) memang sudah terbukti sebagai faktor penting.



Gambar 2. Klasifikasi Ketinggian Gelombang Laut

Berdasarkan klasifikasi tinggi gelombang tersebut, Swell dinilai paling baik apabila dimanfaatkan sebagai WEC karena dinilai paling ideal diantara ke-5 klasifikasi ombak tersebut. Swell memiliki energi yang optimal dengan ketinggian gelombang 2-4 meter yang memberikan energi tanpa menimbulkan kerusakan yang signifikan. Memiliki konsistensi yang lebih teratur dan dapat diprediksi agar memungkinkan perencanaan produksi energi yang lebih baik. Namun disamping itu, terdapat pula dampak dari penggunaan gelombang laut, yakni dapat mengakibatkan korosi pada WEC seperti Pelamis dan Point-Absorber.

Pada Point-Absorber, memiliki dimensi kecil dan penerimaan energi yang lebih banyak dari segala arah, sehingga lebih fleksibel di lokasi dengan gelombang datang tidak konsisten [8]. Point-Absorber menggunakan Power Take-Off (PTO) yang dikontrol dengan algoritma optimasi sedangkan Pelamis sulit menerapkan kontrol efisien karena gerakannya kompleks [2]. Pada Perairan Selatan Jawa seperti Pantai Selatan Jawa Barat, Jogja, hingga Jawa Timur dinilai memiliki potensi yang besar untuk pengembangan Point-Absorber karena memiliki rata-rata energi gelombang tahunan yang cukup tinggi walaupun tidak konsisten. Selat Bali dan Selat Lombok juga memiliki potensi yang cocok untuk pengembangan Point-Absorber ini. Arus laut yang kuat antara Samudra Hindia dan Laut Flores membuat gelombangnya terbentuk dari interaksi arus, pasang surut, dan angin yang bertiup melalui celah sempit antar pulau.

Secara umum, desain dari Point-Absorber dinilai lebih sederhana (buoy) dibanding sistem panjang berengsel seperti Pelamis yang memiliki sambungan yang kompleks dan memerlukan perawatan sambungan [10]. Kelemahan desain (sambungan berengsel kompleks, kebutuhan perawatan tinggi, risiko kegagalan mekanik pada engsel) membuat biaya operasional untuk Pelamis meningkat [14]. Studi reliability memodelkan kegagalan komponen pada WEC menunjukkan tingginya laju kegagalan komponen tersusun untuk desain berengsel yang mempengaruhi ketersediaan energi dan biaya perbaikan [1]. Daerah yang berpotensi untuk pengembangan Pelamis di Indonesia yaitu Samudra Hindia- Selatan Jawa dan Bali karena memiliki gelombang yang stabil dan tidak terlalu ekstrem.

Tabel 1. Karakteristik Material pada WEC

| Jenis WEC      | Nama material         | Daya Tahan Korosi                                                                 | Biaya Material | Masa Pakai  | Kegunaan                                                                                                                                           | Perawatan             |
|----------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Point Absorber | Baja tahan karat      | Sangat tahan korosi, terutama grade 316L. Cocok untuk struktur utama              | Sedang-tinggi  | 20-30 Tahun | Digunakan pada struktur utama, memiliki bentuk yang kaku cocok untuk Point Absorber                                                                | Minim perawatan       |
|                | Komposit serat karbon | Sangat tahan korosi, ringan                                                       | Tinggi         | 20-25 Tahun | Digunakan untuk komponen utama, meningkatkan buoyancy                                                                                              | Rendah                |
|                | Polimer/Elastomer     | Tahan korosi, tetapi terdegradasi UV dan fisik                                    | Rendah-sedang  | 10-15 Tahun | Sering digunakan sebagai pelapis anti-korosi atau seal                                                                                             | Periodik              |
| Pelamis        | Baja tahan karat      | Tahan Korosi, bila digunakan pada sambungan fleksibel perlu perlindungan tambahan | Sedang-tinggi  | 20-30 Tahun | Digunakan untuk struktur utama, tetapi sambungan fleksibel sering memakai logam tipis. Kurang cocok untuk Pelamis                                  | Butuh perawatan lebih |
|                | Komposit serat karbon | Sangat tahan korosi, ringan, dan fleksibel                                        | Tinggi         | 20-25 Tahun | Digunakan untuk bagian fleksibel dan ringan agar memungkinkan banding antar segmen                                                                 | Rendah                |
|                | Polimer/Elastomer     | Tahan korosi, fleksibel                                                           | Rendah-sedang  | 10-15 Tahun | Digunakan untuk sambungan antar-seksi untuk fleksibilitas dan meredam stres akibat ombak laut. Bagus untuk Pelamis agar lebih fleksibel lapisannya | Periodik              |

## KESIMPULAN

Berdasarkan kajian literatur, penelitian ini menyimpulkan beberapa hal terkait pengembangan teknologi Wave Energy Converter (WEC), khususnya tipe Point-Absorber dan Pelamis, dalam konteks tantangan korosi dan potensi implementasinya di Indonesia.

1. Teridentifikasi perbedaan kerentanan korosi yang signifikan antara kedua jenis WEC. Struktur Point-Absorber sangat rentan terhadap fenomena *corrosion fatigue*, yang dipicu oleh kombinasi beban siklik dari gerakan naik-turun yang konstan dan lingkungan laut yang korosif. Sementara itu, desain Pelamis yang terdiri dari beberapa segmen yang terhubung oleh sambungan engsel, lebih rentan terhadap *crevice corrosion* dan *fretting corrosion* pada area sambungan tersebut, yang menjadi titik lemahnya.
2. Kajian material menunjukkan bahwa baja tahan karat grade 316L dan material komposit serat karbon menawarkan ketahanan korosi dan rasio kekuatan-terhadap-berat yang unggul untuk kedua jenis WEC. Namun, untuk teknologi seperti Pelamis, diperlukan pendekatan rekayasa

material yang lebih khusus, seperti pelapis tahan aus dan desain yang meminimalkan celah, untuk melindungi sambungan engselnya yang kritis.

3. Potensi energi gelombang laut Indonesia, meskipun besar, memerlukan pendekatan yang realistis dan kontekstual. Faktor ekonomi menjadi penentu utama, di mana pemanfaatan material lokal dan sistem proteksi seperti pelapis pada baja karbon dapat menjadi strategi yang lebih berkelanjutan dibandingkan impor material mahal. Selain potensi gelombang (misalnya, dari swell Samudera Hindia di selatan Jawa), kesiapan implementasi juga sangat bergantung pada kedekatan dengan infrastruktur kelistrikan eksisting, kemudahan akses perawatan, kerangka kebijakan pemerintah yang mendukung, serta kajian dampak lingkungan dan sosial yang komprehensif

## REFERENSI

- [1] A. Ghaedi, R. Sedaghati, M. Mahmoudian, and S. Bazyari, "Reliability modeling of wave energy converters based on pelamis technology," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 227, pt. A, p. 109977, Feb. 2024. doi: 10.1016/j.epsr.2023.109977.
- [2] B. Guo et al., "A Review of Point Absorber Wave Energy Converters," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 10, p. 1534, Oct. 2022. doi: 10.3390/jmse10101534.
- [3] Corrosionpedia, "Crevice Corrosion," *Corrosionpedia Dictionary*, Oct. 16, 2020. [Online]. Available: <https://www.corrosionpedia.com/definition/171/crevice-corrosion>
- [4] C.-P. Yeh, K.-C. Tsai, and J.-Y. Huang, "Effects of relative humidity on crevice corrosion behavior of 304L stainless-steel nuclear material in a chloride environment," *Metals*, vol. 9, no. 11, p. 1185, Nov. 2019. doi: 10.3390/met9111185.
- [5] H. Baránková, L. Bárdos, M. Bergkvist, R. Waters, M. Grabbe, and M. Leijon, "Coatings for Renewable Energy," Ångström Laboratory, Uppsala University, Uppsala, Sweden. [https://www.svc.org/clientuploads/directory/resource\\_library/09\\_339.pdf](https://www.svc.org/clientuploads/directory/resource_library/09_339.pdf)
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2022. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_FullReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf)
- [7] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Innovation\\_Outlook\\_Ocean\\_Energy\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Innovation_Outlook_Ocean_Energy_2020.pdf)
- [8] J. Fernandez-Chozas and A. Pecher, *Benchmark Study of Wave Energy Converters*. Department of Civil Engineering, Wave Energy Research Group, 2013, Contract Report No. 146.
- [9] M. J. Muliawan, M. Karimirad, T. Moan, and Z. Gao, "STC (Spar-Torus Combination): A combined spar-type floating wind turbine and large point absorber floating wave energy converter — Promising and challenging," in *Proc. ASME 2012 31st Int. Conf. Ocean, Offshore Arctic Eng.*, Rio de Janeiro, Brazil, Jul. 2012. doi: 10.1115/OMAE2012-84272.
- [10] N. A. Author, "Pelamis Wave Energy Converter," in *Oceanic Wave Energy Conversion: Advancement of Electrical Generators*, 1st ed., Singapore: Springer Nature, 2024, ch. 3, pp. 45-66. doi: 10.1007/978-981-99-9814-2\_3.
- [11] N. Larché et al., "Crevice corrosion of duplex stainless steels in natural and chlorinated seawater," *Cambridge University Press*, Feb. 2, 2012. doi: 10.1051/metal/2011080.
- [12] S. Musabikha, I. K. A. P. Utama, and Mukhtasor, "Corrosion in the marine renewable energy: A review," *Int. J. Environ. Res. Clean Energy*, vol. 7, no. 1, 2017. [Online]. Available: <http://isomase.org/IJERCE1.php>
- [13] T. Aderinto and H. Li, "Ocean wave energy converters: Status and challenges," *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1250, 2018. doi: 10.3390/en11051250.
- [14] Y. K. Cai, Y. Zhao, Z. K. Zhang, X. B. Ma, and B. Cheng, "Atmospheric and Marine Corrosion: Influential Environmental Factors and Models," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1314, 2019, Art. no. 012149, doi: 10.1088/1742-6596/1314/1/012149.
- [15] Y. Yang, C. Chen, Y. Zhuang, and Z. Suo, "Reviewing the progress of corrosion fatigue research on marine structures," *Front. Mater.*, vol. 11, Aug. 2024, Art. no. 1399292. doi: 10.3389/fmats.2024.1399292.