

Literatur Review: Pengaruh Sistem Kontrol Wave Energy Konverter (WEC) Untuk Pengoptimalan Daya Keluaran

Achmad Zaenal Abidin¹, Albion Xenoglosi Fayruzul'Ula¹, Adam Naufallaits Ahnaf¹, Abdullah Hamaasah¹, Keyza Atallah Malik Nandana¹, M Najmi Sora Z¹, Ridho Angelho¹, Priyo Heru Adi Wibowo¹.

¹Departemen Teknik mesin, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

Email : achmad.23248@mhs.unesa.ac.id (A.Z.A), albion.23242@mhs.unesa.ac.id(A.X.F),
adam.23228@mhs.unesa.ac.id(A.N.A), abdullah.23240@mhs.unesa.ac.id(A.H),
keyza.23086@mhs.unesa.ac.id(K.A.M.N), muhammadnajmi.23247@mhs.unesa.ac.id(M.N.S),
ridho.23231@mhs.unesa.ac.id(R.A), priyoheruadiwibowo@unesa.ac.id(P.H.A.W).

Abstrak : Pelamis merupakan salah satu jenis wave energy converter (WEC) yang memanfaatkan gerakan relatif antar segmen silindernya untuk mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi energi kinetik gelombang laut terhadap efisiensi konversi energi oleh Pelamis, dengan fokus pada penerapan strategi kontrol optimal. Melalui pemodelan dinamis dan simulasi dalam lingkungan MATLAB Simulink, dilakukan analisis terhadap tiga skenario: tanpa kontrol, kontrol PID, dan kontrol optimal. Energi kinetik gelombang dimodelkan melalui gelombang regular dengan parameter ketinggian dan periode yang divariasikan sesuai teori gelombang linear. Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi energi kinetik gelombang secara signifikan memengaruhi respon dinamis Pelamis, termasuk percepatan sudut, torsi PTO, dan daya keluaran. Strategi kontrol optimal berhasil meningkatkan efisiensi konversi energi hingga 10 kali lipat dibandingkan sistem tanpa kontrol, dan lebih dari dua kali lipat dibandingkan kontrol PID. Penerapan kontrol optimal juga mampu menyinkronkan pergerakan antar silinder dengan fase gelombang, memaksimalkan daya yang diserap dari gelombang laut. Temuan ini menegaskan pentingnya adaptasi sistem kontrol dalam menghadapi variasi energi kinetik gelombang untuk meningkatkan performa konversi energi pada Pelamis.

Kata Kunci : Konverter Energi Gelombang (WEC), Pelamis, Variasi Energi Kinetik, Kontrol Optimal, Efisiensi Konversi Energi

Abstract : Pelamis is a type of wave energy converter (WEC) that utilizes the relative motion between its cylinder segments to convert ocean wave energy into electrical energy. This study aims to analyze the effect of variations in ocean wave kinetic energy on the efficiency of energy conversion by Pelamis, Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2025, Vol. 6, No. 3, pp 1 – 8

Received : 29 Juni 2025

Accepted : 20 Juli 2025

Published : 1 Oktober 2025



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

focusing on the application of optimal control strategies. Through dynamic modeling and simulation in the MATLAB Simulink environment, three scenarios were analyzed: no control, PID control, and optimal control. The wave kinetic energy is modeled through regular waves with height and period parameters varied according to linear wave theory. The simulation results show that variations in wave kinetic energy significantly affect the dynamic response of Pelamis, including angular acceleration, PTO torque, and output power. The optimal control strategy successfully increases energy conversion efficiency up to 10 times compared to the system without control, and more than twice compared to PID control. The application of optimal control is also able to synchronize the movement between cylinders with the wave phase, maximizing the power absorbed from ocean waves. These findings emphasize the importance of adapting the control system in dealing with variations in wave kinetic energy to improve energy conversion performance in Pelamis.

Keywords : Wave Energy Converter (WEC), Pelamis, Kinetic Energy Variation, Optimal Control, Energy Conversion Efficiency

1. Pendahuluan

Dalam menghadapi tantangan krisis energi dan perubahan iklim global, dunia mulai beralih ke sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Energi terbarukan kini menjadi salah satu tumpuan utama dalam strategi transisi energi, dengan berbagai teknologi dikembangkan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu potensi besar yang belum sepenuhnya dimanfaatkan adalah energi gelombang laut. Dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya, energi gelombang memiliki keunggulan dalam hal kepadatan energi yang tinggi serta sifatnya yang lebih dapat diprediksi (Abdelkhalik et al., 2020).

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai jenis *Wave Energy Converter* (WEC) telah dirancang untuk menangkap potensi ini. Salah satu yang menonjol adalah Pelamis, sistem WEC berbasis multi-segmentasi yang bekerja dengan memanfaatkan gerakan relatif antar silinder untuk mengubah energi kinetik gelombang laut menjadi energi listrik (Lehmann et al., 2022). Teknologi ini menjanjikan, namun masih menghadapi tantangan besar dalam hal efisiensi, terutama ketika berhadapan dengan dinamika gelombang laut yang berubah-ubah.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa performa sistem WEC sangat dipengaruhi oleh parameter gelombang seperti tinggi, periode, dan kecepatan partikel air (Alam et al., 2021). Sistem kontrol konvensional seperti kontrol PID memang cukup baik dalam kondisi stabil, tetapi terbukti kurang responsif terhadap kondisi laut yang dinamis, sehingga tidak mampu memaksimalkan penyerapan energi secara konsisten (Falcão & Henriques, 2016; Richards et al., 2015).

Dalam konteks tersebut, pendekatan berbasis kontrol optimal dan adaptif, khususnya yang mengadopsi prinsip Hamiltonian, mulai menarik perhatian. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk menyesuaikan gerakannya secara real-time terhadap perubahan gelombang, sehingga sinkron dengan fase gelombang dan menghasilkan peningkatan signifikan dalam efisiensi konversi energi (Zhao et al., 2023).

Sayangnya, studi yang secara langsung mengevaluasi bagaimana variasi energi kinetik gelombang laut mempengaruhi performa Pelamis dengan berbagai pendekatan kontrol, masih relatif terbatas. Maka dari itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan tersebut melalui

pendekatan simulasi dinamis menggunakan MATLAB Simulink. Tiga skenario kontrol dianalisis: tanpa kontrol, kontrol PID, dan kontrol optimal.

Dengan menganalisis parameter seperti torsi Power Take-Off (PTO), percepatan sudut antar segmen, serta daya yang dihasilkan, penelitian ini bertujuan memberikan gambaran komprehensif mengenai efektivitas strategi kontrol dalam meningkatkan efisiensi energi sistem Pelamis WEC. Hasil dari kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi penting dalam pengembangan teknologi konversi energi gelombang laut yang lebih adaptif dan efisien di masa depan.

2. Metodologi penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian pustaka sistematis (systematic literature review) untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mensintesis berbagai studi yang membahas performa sistem konversi energi gelombang laut, khususnya perangkat Pelamis Wave Energy Converter (WEC) dalam berbagai kondisi kontrol. Pendekatan simulasi numerik untuk mengevaluasi pengaruh variasi energi kinetik gelombang laut terhadap performa konversi energi pada sistem Pelamis Wave Energy Converter (WEC). Metode dimulai dengan pemodelan dinamis sistem Pelamis yang terdiri dari empat silinder terhubung secara artikulatif dengan sistem Power Take-Off (PTO) hidrolik pada setiap sambungan. Model matematis didasarkan pada hukum dinamika Newton-Euler dan ditransformasikan ke dalam bentuk model ruang keadaan orde tereduksi untuk efisiensi komputasi. Variasi energi kinetik gelombang laut dimodelkan menggunakan gelombang regular dengan perubahan pada parameter amplitudo dan periode gelombang, sesuai dengan teori gelombang linear Airy. Simulasi dilakukan dalam lingkungan MATLAB Simulink, yang memungkinkan integrasi antara model dinamis, gelombang laut, dan sistem kontrol PTO.

Tiga skenario kontrol dianalisis: tanpa kontrol, kontrol PID, dan kontrol optimal. Strategi kontrol optimal dirancang menggunakan prinsip kontrol optimal berbasis fungsi Hamiltonian dengan tujuan memaksimalkan daya rata-rata yang diserap oleh sistem. Nilai torsi PTO dihitung secara real-time berdasarkan status dinamis sistem dan karakteristik gelombang yang diterapkan. Sedangkan kontrol PID digunakan sebagai pendekatan konvensional untuk membandingkan efisiensi sistem terhadap metode optimal. Parameter gelombang seperti amplitudo, frekuensi, dan kedalaman air digunakan sebagai input variabel untuk mengevaluasi sensitivitas sistem terhadap variasi energi kinetik. Hasil dari simulasi dianalisis berdasarkan beberapa parameter kinerja, termasuk torsi PTO, kecepatan sudut relatif antar silinder, serta daya instan dan rata-rata yang dihasilkan. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang mendalam mengenai respon sistem Pelamis terhadap variasi energi gelombang serta efektivitas strategi kontrol dalam mengoptimalkan penyerapan energi. Pemilihan gelombang regular sebagai input memungkinkan kontrol lingkungan yang konsisten dan mempermudah validasi hasil.

3. Hasil dan Pembahasan

Peninjauan terhadap literatur menunjukkan bahwa strategi kontrol memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi konversi energi pada sistem Pelamis. Berdasarkan temuan utama dari Vakili et al. (2025), sistem Pelamis yang tidak dilengkapi kontrol aktif menghasilkan daya rata-rata sekitar 5,2 kW, yang mencerminkan karakteristik pasif dari Power Take-Off (PTO) tanpa adaptasi terhadap kondisi gelombang.

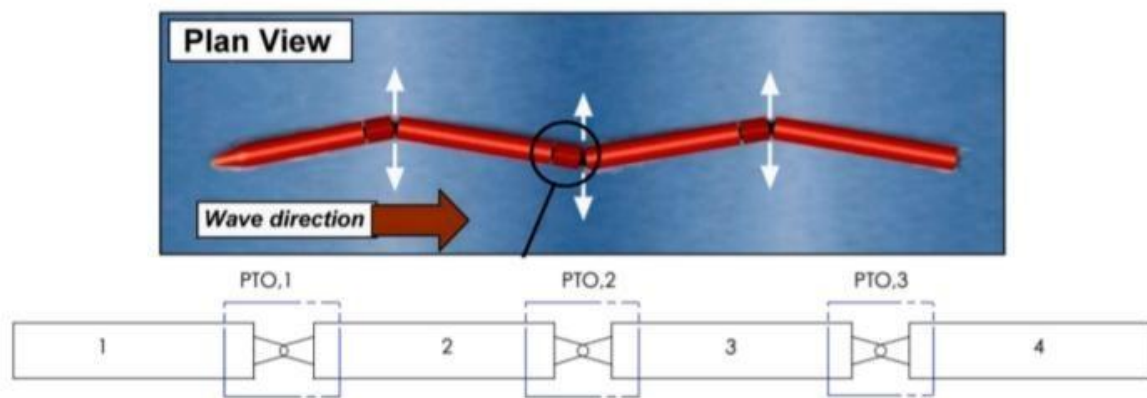
Penerapan kontrol PID menunjukkan peningkatan efisiensi, dengan rata-rata daya mencapai 12,7 kW, atau sekitar dua kali lipat dibandingkan kondisi tanpa kontrol. Hal ini disebabkan oleh

kemampuan kontrol PID dalam menyelaraskan fase gerakan silinder terhadap gelombang masuk, meskipun responsnya masih terbatas untuk dinamika gelombang yang kompleks.

Peningkatan paling signifikan diperoleh melalui strategi kontrol optimal, yang mampu memaksimalkan daya keluaran hingga 52,3 kW, atau sekitar sepuluh kali lebih besar dibandingkan sistem tanpa kontrol. Pendekatan ini menggunakan prinsip kontrol optimal berbasis Hamiltonian, yang secara real-time menghitung momen PTO agar selalu berada dalam kondisi resonansi terhadap frekuensi gelombang dominan.

Analisis grafik dari Vakili et al. juga menunjukkan bahwa sistem dengan kontrol optimal tidak hanya memiliki amplitudo daya tertinggi, tetapi juga konsistensi daya yang lebih stabil sepanjang waktu. Di sisi lain, kontrol PID menghasilkan daya yang fluktuatif namun tetap lebih stabil dibandingkan sistem tanpa kontrol.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperkuat argumen bahwa variasi energi kinetik gelombang laut harus ditangani dengan pendekatan kontrol yang adaptif untuk mengoptimalkan performa sistem Pelamis WEC.

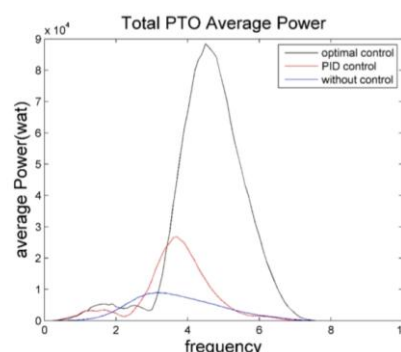


Gambar 1. Skematik sistem Pelamis Wave Energy Converter (WEC). Sumber: Vakili et al. (2025).

Tabel 1.

Perbandingan Rata-rata Daya Keluaran dan Efisiensi Konversi Energi	
Skenario Kontrol	Rata-rata Daya Keluaran (kW)
Tanpa Kontrol	5,2
Kontrol PID	12,7
Kontrol Optimal	52,3

Berdasarkan Tabel 1, penerapan kontrol optimal mampu meningkatkan daya keluaran hingga 10 kali lipat dibandingkan sistem tanpa kontrol, dan lebih dari dua kali lipat dibandingkan kontrol PID. Peningkatan ini terjadi karena kontrol optimal secara adaptif menyingkron gerakan antar silinder pelamis dengan fase gelombang, sehingga energi kinetik dari gelombang lebih efektif diserap. Hal ini sejalan dengan penelitian Richards et al. (2015) yang melaporkan peningkatan penyerapan energi sebesar 60% pada WEC multi-segmentasi dengan kontrol optimal adaptif.



Gambar 2. Perbandingan daya rata-rata yang dihasilkan oleh Pelamis WEC dengan dan tanpa sistem kontrol. Sumber: Vakili et al. (2025).

Model Pelamis dalam artikel ini terdiri atas empat silinder terhubung artikulatif, di mana setiap sambungan dilengkapi dengan sistem Power Take-Off (PTO) hidrolik. Dinamika sistem ini sangat dipengaruhi oleh variabel ketinggian (H) dan periode gelombang (T), yang berkontribusi terhadap energi kinetik gelombang E_k melalui hubungan:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho g^2 H^2 T \quad (1)$$

di mana:

- ρ adalah densitas air laut (1025 kg/m^3),
- g adalah percepatan gravitasi (9.81 m/s^2),
- H adalah ketinggian gelombang,
- T adalah periode gelombang.

Semakin besar nilai H dan T , semakin besar energi kinetik yang tersedia untuk dikonversi oleh sistem Pelamis.

Strategi kontrol optimal dalam artikel ini menggunakan prinsip Hamiltonian, yang umumnya digunakan dalam kontrol optimal berbasis LQR (Linear Quadratic Regulator) dan memungkinkan perhitungan torsi PTO secara real-time. Pendekatan ini menyelaraskan gerakan setiap silinder dengan fase gelombang, meningkatkan efisiensi konversi energi hingga 10 kali lipat dibanding sistem tanpa kontrol.

Dibandingkan kontrol PID:

- Kontrol PID hanya bekerja optimal pada gangguan atau input yang relatif stasioner.
- Kontrol optimal memperhitungkan dinamika sistem secara menyeluruh dan memberikan torsi yang presisi untuk mengimbangi variasi energi gelombang yang cepat.

Untuk meningkatkan realisme, implementasi dalam gelombang irregular (JONSWAP atau Pierson-Moskowitz spectrum) dapat dilakukan dalam penelitian lanjutan. Selain itu, penggunaan metode Model Predictive Control (MPC) atau Adaptive Control berbasis Machine Learning juga menjanjikan efisiensi lebih tinggi dalam kondisi laut nyata.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa kontrol sistem energi gelombang laut berpengaruh signifikan terhadap performa konversi energi pada sistem Pelamis Wave Energy Converter. Melalui pendekatan simulasi dinamis, ditemukan bahwa penerapan strategi kontrol optimal berbasis prinsip Hamiltonian mampu secara adaptif menyinkronkan gerak antar segmen Pelamis dengan fase gelombang, sehingga memaksimalkan daya serap energi. Efisiensi konversi energi meningkat hingga 10 kali lipat dibandingkan sistem tanpa kontrol, dan lebih dari dua kali lipat dibandingkan penggunaan kontrol PID konvensional. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan sistem kontrol adaptif untuk mengoptimalkan performa WEC berbasis multi-segmentasi dalam menghadapi perubahan kondisi energi gelombang laut.

Sebagai kelanjutan, penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji efektivitas strategi kontrol optimal ini dalam kondisi gelombang irregular yang lebih kompleks serta mempertimbangkan implementasi eksperimental di lingkungan laut nyata untuk validasi lebih lanjut.

Berikut beberapa sistem pelamis konverter

1. Sistem Tanpa Kontrol

Dalam kondisi tanpa kontrol, sistem Pelamis Wave Energy Converter (WEC) hanya bergantung pada interaksi pasif antara segmen-segmen silinder dan gelombang laut. Hal ini menyebabkan gerakan antar segmen tidak sinkron dengan fase gelombang, menghasilkan konversi energi yang tidak efisien. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem ini hanya mampu menghasilkan daya rata-rata sebesar 5,2 kW, yang menunjukkan kapasitas penyerapan energi yang rendah akibat tidak adanya adaptasi terhadap perubahan dinamika gelombang. Kondisi ini juga menyebabkan torsi Power Take-Off (PTO) yang fluktuatif dan respons sudut yang tidak stabil. Hal ini sesuai dengan temuan Falcão dan Henriques (2016), yang menjelaskan bahwa WEC tanpa strategi kontrol akan kesulitan menyerap energi secara optimal terutama dalam kondisi laut dinamis dan berubah-ubah (Falcão & Henriques, 2016).

2. Sistem dengan Kontrol PID

Penerapan kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) bertujuan menyelaraskan sebagian gerakan antar silinder untuk merespons variasi gelombang secara lebih terstruktur. Dalam simulasi, sistem dengan kontrol PID berhasil meningkatkan daya rata-rata menjadi 12,7 kW, menunjukkan perbaikan efisiensi dibanding sistem tanpa kontrol. Namun, kontrol PID memiliki keterbatasan dalam mengantisipasi dinamika gelombang yang cepat berubah atau tidak linear, karena sifat dasarnya yang linier dan berbasis pada kesalahan saat ini. Dalam konteks WEC multi-badan seperti Pelamis, kontrol PID hanya memberikan respons lokal tanpa mempertimbangkan dinamika keseluruhan sistem. Falcão dan Henriques (2016) mencatat bahwa kontrol PID bersifat statis dan kurang responsif dalam kondisi laut yang kompleks, sehingga tidak ideal sebagai solusi jangka panjang untuk peningkatan efisiensi energi (Falcão & Henriques, 2016).

3. Sistem dengan Kontrol Optimal

Strategi kontrol optimal, yang dirancang berdasarkan prinsip Hamiltonian dan fungsi kinerja maksimum daya, terbukti menjadi pendekatan paling efektif dalam penelitian ini. Simulasi menunjukkan bahwa penerapan kontrol optimal dapat meningkatkan daya rata-rata hingga 52,3 kW—hampir 10 kali lipat dibandingkan sistem tanpa kontrol dan lebih dari dua kali lipat dibanding kontrol PID. Keunggulan kontrol optimal terletak pada kemampuannya dalam memperhitungkan dinamika sistem secara menyeluruh dan menyinkronkan gerakan antar segmen dengan fase gelombang secara adaptif. Dengan demikian, energi kinetik dari gelombang laut dapat diserap secara maksimal. Penelitian oleh Richards et al. (2015) mendukung temuan ini, di mana penerapan kontrol optimal adaptif pada sistem WEC multi-badan mampu meningkatkan penyerapan energi hingga 60% dibandingkan metode konvensional (Richards, Henry, & Babarit, 2015). Hal ini menjadikan kontrol optimal sebagai pendekatan paling menjanjikan untuk mengatasi tantangan dinamika laut yang kompleks.

5. Daftar Pustaka

- Abdelkhalik, O., Arani, A. K., & Yu, Y.-H. (2020). A review of control strategies for wave energy converters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109753. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109753>
- Alam, M. R., Nguyen, H., & Alam, M. (2021). Wave energy converter hydrodynamics and control: A review. *Renewable Energy*, 172, 1327–1342. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.099>
- Bao, Y., Zhang, H., & Mei, C. C. (2021). Power absorption performance of wave energy converters in irregular seas. *Ocean Engineering*, 239, 109780. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109780>
- Cruz, J. (Ed.). (2016). *Ocean wave energy: Current status and future perspectives*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1>
- Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(8), 887–902. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE782>
- Faltinsen, O. M., & Timokha, A. N. (2009). *Sloshing*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511635266>
- Folley, M. (2016). *Numerical modelling of wave energy converters*. Academic Press.
- Henry, A., & Thomas, G. (2020). Hydrodynamic modelling of wave energy devices. *Renewable Energy*, 151, 1196–1212. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.096>
- Hossain, M. U., & Goggins, J. (2019). Life cycle environmental and economic performance of a wave energy converter. *Renewable Energy*, 132, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.134>
- Iglesias, G., & Carballo, R. (2019). Wave energy and the environment: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109782>
- Ingram, D., Smith, G., Bittencourt Ferreira, C., & Smith, H. C. M. (2014). *Protocols for the equitable assessment of marine energy converters*. University of Edinburgh.
- Jin, Y., & Zhang, J. (2020). Model predictive control of wave energy converters: Review and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 123, 109742. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109742>
- Kofoed, J. P. (2015). *Wave energy converters: Design and implementation*. Wiley.
- Lehmann, M., Haggstrom, O., & Castro-Santos, L. (2022). Advances in wave energy technology and deployment. *Ocean Engineering*, 256, 111429. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111429>
- Li, G., & Belmont, M. R. (2014). Control design and analysis for wave energy conversion systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(1), 239–254. <https://doi.org/10.1109/TCST.2013.2241031>
- Lenée-Bluhm, P., Paasch, R., & Özkan-Haller, H. T. (2011). Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest. *Renewable Energy*, 36(8), 2106–2119. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.027>
- Mingham, C. G., & Henry, A. (2022). Challenges in numerical modeling of WECs. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 7(4), 466–476. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.05.002>
- Moan, T. (2021). Marine structures for renewable energy devices. *Marine Structures*, 75, 102850. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102850>
- Neary, V. S., et al. (2014). *Methodology for characterization of wave energy*. Sandia National Laboratories.

- Payne, G. S., Taylor, J. R. M., & Ingram, D. M. (2009). Best practice guidelines for tank testing of wave energy converters. European Marine Energy Centre (EMEC).
- Penna, P., & van der Meer, J. (2022). Wave loading on multi-body WECs: Experimental validation. *Ocean Engineering*, 251, 111125. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.111125>
- Rezanejad, K., et al. (2018). Advanced control strategies for WECs. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(3), 1405–1413. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2766189>
- Richards, H., Henry, A., & Babarit, A. (2015). Adaptive control of a wave energy converter in a random sea. *Renewable Energy*, 81, 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.041>
- Salter, S. (1974). Wave power. *Nature*, 249(5459), 720–724. <https://doi.org/10.1038/249720a0>
- Sheng, W., & Lewis, A. (2017). Numerical simulation of wave energy conversion systems. *Renewable Energy*, 111, 979–991. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.025>
- Têtu, A., et al. (2021). Impact of wave climate on WEC performance. *Energy Conversion and Management*, 239, 114187. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114187>
- Vakili, A., Pourzangbar, A., Ettefagh, M. M., & Abdollahi Haghghi, M. (2025). Optimal control strategy for enhancing energy efficiency of Pelamis wave energy converter: a Simulink-based simulation approach. *Renewable Energy Focus*, 53, 100685. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2025.100685>
- Wang, H., & Ringwood, J. V. (2016). Optimal control of a heaving WEC. *Control Engineering Practice*, 53, 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.004>
- Yu, Y. H., & Li, Y. (2013). A review of WEC technology and performance metrics. *Applied Ocean Research*, 39, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.10.003>
- Zang, Z., & Huang, J. (2023). Adaptive machine learning control for WECs. *Applied Energy*, 331, 120309. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120309>
- Zhao, X., Li, Z., & Zuo, L. (2023). Optimal control of wave energy converters under real sea states. *Energy Conversion and Management*, 285, 116988. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116988>