

SIMULASI GELOMBANG AIR DANGKAL UNTUK PEMBANGKIT ENERGI *OSCILLATING WATER COLUMN*

Eka Andhika Kurniawan^{1,*}, Annisa Aditsania², P. H. Gunawan³

¹Computational Science, School of Computing – Telkom University [Email: dicka139@gmail.com]

²Computational Science, School of Computing – Telkom University [Email: annisaaditsania@gmail.com]

³Computational Science, School of Computing – Telkom University [Email: phgunawan@telkomuniversity.ac.id]

*Corresponding Author

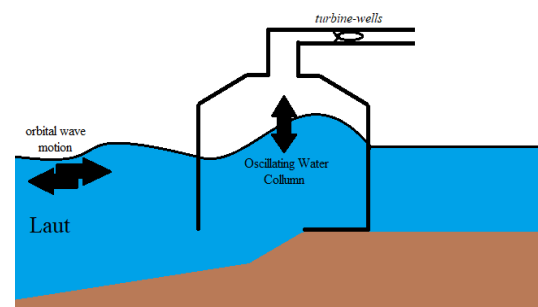
ABSTRACT

Development of human causes the increasing of the demand of energy for living. Sea wave energy is one of the alternative energy sources which is renewable and sustainable, no impact on environmental pollution. The goal of this paper is to simulate the level of water wave using shallow water equation for generating energy oscillating water column. The solution of the equation is approximated using Lax-Friedrich scheme and will be compared with the analytic solution in standing wave problem. Simulation is used to obtain the results of the energy in the form of electrical power generated by ocean wave. The results of the error of numerical validation is obtained 0.32%. Moreover, the results of the potential energy depend on the height of the surface waves is found 1574.46 Watts the average of water level is 0.881 meters.

Keywords: shallow water equation, Lax-Friedrich oscillating water column, energy, simulation.

1 PENDAHULUAN

Seiring dengan bertambahnya kebutuhan manusia, maka kebutuhan energipun semakin meningkat. Pemenuhan energi dari bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui dan semakin mahal dikarenakan menipisnya bahan bakar fosil tersebut. Oleh karena itu, dibutuhkan sumber energi lain yang lebih terbarukan. Melihat dari topografi Indonesia yang dikelilingi oleh laut, sangat dimungkinkan untuk menggunakan teknologi sistem konversi energi gelombang laut yaitu teknologi *Oscillating Water Column* (OWC). Sistem OWC pertama kali dibangun pada tahun 2006 oleh Leão (2005). OWC merupakan teknologi yang menggunakan tekanan udara dari ruangan kedap air untuk menggerakkan *turbine-wells* yang nantinya menghasilkan energi. Skema dari teknologi OWC dapat dilihat pada Gambar 1 yang didapat dari Wijaya and Wayan (2012).



Gambar 1. Ilustrasi penempatan *Oscillating Water Column* (OWC) daerah pesisir laut.

Di dalam ruangan OWC tersebut terdapat fluida dinamis, dikarenakan fluida tersebut bergerak dan ideal. Suatu fluida dapat dikatakan fluida ideal jika memiliki sifat tidak dapat dimampatkan, yaitu aliran fluida tidak kental dan tidak berputar. Untuk fluida ideal yang memiliki panjang gelombang jauh lebih besar dibandingkan kedalaman fluida tersebut, berlaku persamaan air dangkal

atau *shallow water equation*. Oleh karena itu, untuk menjamin solusi hasil metode *Lax-Friedrich* memiliki tingkat *error/galat* yang minimum, maka perlu dilakukan perbandingan solusi tersebut dengan solusi analitik *standing wave*.

Tujuan dari penulisan makalah ini yaitu, mendapatkan hasil dari simulasi pergerakan gelombang laut dangkal dan mengetahui besar potensi energi listrik yang dihasilkan oleh OWC dari simulasi. Batasan masalah pada makalah ini yaitu, permasalahan ditinjau sebagai masalah satu dimensi, fluida yang dimaksudkan adalah air laut. Hasil yang diharapkan berupa besar energi yang dihasilkan tiap perubahan gelombang laut, dimana energi tersebut menghasilkan daya listrik dalam satuan *Watt*.

2 PERSAMAAN AIR DANGKAL

Persamaan air dangkal merupakan persamaan sistem hiperbolik yang biasa digunakan untuk visualisasi pergerakan gelombang dalam fluida ideal dengan asumsi kedalaman fluida relatif kecil dibanding dengan panjang gelombang, seperti yang telah dipaparkan oleh Kantha and Clayson (2000); Kämpf (2010); Strauss (1992); Gunawan and Lhébrard (2015) dan Cushman-Roisin (1994). Dalam penelitian ini membahas persamaan air dangkal satu dimensi. Menurut Kämpf pada *Long Waves in a Channel* Kämpf and Kämpf (2009), persamaan *half-linier* dari persamaan gelombang air dangkal satu dimensi adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial(u(x,t)h(x,t))}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -g\frac{\partial \eta(x,t)}{\partial x}. \quad (2)$$

dengan $\eta(x,t)$, $h(x,t)$ dan $u(x,t)$ menyatakan masing-masing tinggi permukaan laut, ketebalan air laut dan kecepatan rata-rata horizontal. Sedangkan x , t , dan g adalah masing-masing menyatakan ruang, waktu dan gaya gravitasi.

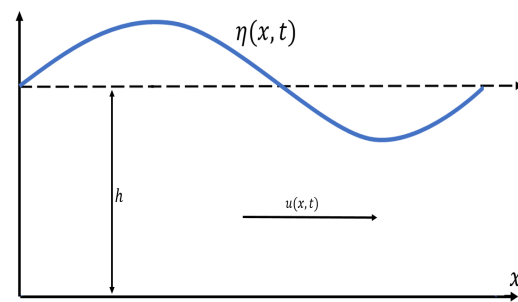
Jika ketebalan air $h(x,y)$ pada persamaan

(1) diasumsikan konstan maka persamaan tersebut dapat ditulis ulang menjadi berikut ini:

$$\frac{\partial \eta(x,t)}{\partial t} = -h\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = -g\frac{\partial \eta(x,t)}{\partial x}. \quad (4)$$

Persamaan (3) mempresentasikan persamaan kontinuitas dari prinsip konservasi massa. Sedangkan persamaan (4) mempresentasikan persamaan momentum yang diperoleh dari prinsip konservasi momentum. Untuk lebih jelas mengenai posisi variabel-variabel persamaan air dangkal, maka dapat dilihat pada Gambar 2.



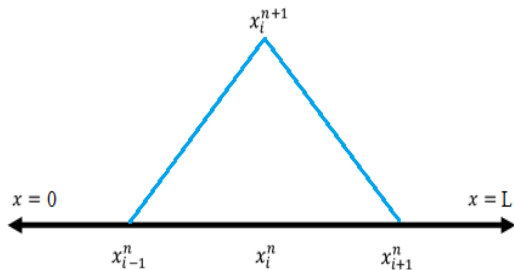
Gambar 2. Struktur persamaan air dangkal untuk satu dimensi.

Dalam membuat simulasi gelombang laut, maka model persamaan air dangkal dihampiri menggunakan pendekatan metode *Lax-Friedrich*. Oleh karena itu, untuk menjamin solusi hasil metode *Lax-Friedrich* memiliki tingkat galat yang minimum, maka perlu dilakukan perbandingan solusi tersebut dengan solusi analitik *standing wave* terlebih dahulu, seperti yang telah dijelaskan oleh Durran (2013); Glaister (1988) dan Kolar et al. (1994).

3 METODE *Lax-Friedrich*

Metode *Lax-Friedrich* merupakan salah satu metode pendekatan numerik mirip dengan metode beda hingga. Metode *Lax-Friedrich* adalah perbaikan dari metode *Forward-Time Central-Space* (FTCS). Pada metode *Lax-Friedrich* nilai dari u_i^n pada FTCS diganti dengan rata-rata dari u_{i+1}^n dan

u_{i-1}^n seperti yang telah dijelaskan oleh Jannah (2016). Diskritisasi posisi metode beda hingga untuk skema *Lax-Friedrich* dengan domain $\Omega = [0, L]$ dan didiskritisasi dengan N titik diskrit dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Stencil skema *Lax-Friedrich* pada domain diskrit untuk spasial dengan $i \in \{0, 1, \dots, N\}$.

Persamaan diskrit skema *Lax-Friedrich* untuk menghampiri solusi persamaan (1-4) dengan nilai domain $i \in \{1, \dots, N-1\}$ dapat dilihat pada persamaan (5) dan (6) berikut ini:

$$\eta_i^{n+1} = \frac{(\eta_{i+1}^n + \eta_{i-1}^n)}{2} - \frac{h\Delta t}{2\Delta x} (u_{i+1}^n - u_{i-1}^n) \quad (5)$$

$$u_i^{n+1} = \frac{(u_{i+1}^n + u_{i-1}^n)}{2} - \frac{g\Delta t}{2\Delta x} (\eta_{i+1}^n - \eta_{i-1}^n) \quad (6)$$

Nilai batas skema *Lax-Friedrich* menggunakan batas Neumann pada permukaan air dan Dirichlet pada kecepatan. Berikut nilai batas yang berlaku pada penelitian ini.

$$\eta_0^{n+1} = \eta_1^{n+1}, \quad \eta_N^{n+1} = \eta_{N-1}^{n+1}, \quad (7)$$

$$u_0^{n+1} = 0, \quad u_N^{n+1} = 0. \quad (8)$$

Untuk mengukur performansi galat yang dihasilkan dari perbandingan metode *Lax-Friedrich* dengan solusi analitik *standing wave* yaitu menggunakan persamaan (9).

$$\|galat\| = \frac{\sum_1^N (\eta_{analitik} - \eta_{numerik})}{N} \quad (9)$$

4 OSCILLATING WATER COLUMN (OWC)

OWC merupakan teknologi yang menggunakan tekanan udara dari ruangan kedap air untuk menggerakkan *turbine-wells* yang nantinya menghasilkan energi seperti yang telah dijelaskan oleh Gareev (2011); Nielsen (1987); Pontes (2001) dan Vining (2005).

Ruangan kedap air pada Gambar (1) dipasang dengan struktur bawah terbuka menghadap laut. Tekanan udara pada ruangan kedap air ini disebabkan oleh pergerakan naik turunnya permukaan gelombang air laut (fluida). Gerakan gelombang di dalam ruangan tersebut merupakan gerakan *compress* dan *decompress* yang ada di atas tingkat air di dalam ruangan. Aliran udara ini didorong melalui pipa ke *turbine-wells* yang digunakan untuk menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan gelombang laut berupa penjumlahan energi potensial dan energi kinetik.

Langkah pertama untuk menentukan besarnya potensi energi gelombang laut hasil OWC adalah mencari besar energi potensial dan energi kinetik yang dihasilkan gelombang laut. Total energi gelombang laut didapatkan dari penjumlahan energi potensial dan energi kinetik Ross (2012); Wijaya and Wayan (2012) dan Leão (2005).

Energi potensial yaitu energi yang ditimbulkan oleh posisi relatif atau konfigurasi gelombang laut di suatu sistem fisik. Besarnya energi yang dihasilkan oleh gelombang laut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan energi potensial.

$$E_P = \frac{1}{2} w \rho g \bar{\eta}^2, \quad (10)$$

dengan:

- w = lebar gelombang (*meter*);
- ρ = massa jenis air laut ($kg/meter^3$);
- g = gravitasi bumi (*meter/detik*);
- $\bar{\eta}$ = amplitudo gelombang (*meter*).

Energi kinetik adalah bagian energi yang berhubungan dengan gerakan dari gelombang laut. Besar energi kinetik dari gelombang laut

yaitu sebanding dengan energi potensial yang dihasilkan.

$$E_K = \frac{1}{2} w \rho g \bar{\eta}^2. \quad (11)$$

Setelah energi potensial dan energi kinetik diketahui, maka dapat dihitung energi total dengan melalui penjumlahan energi potensial (10) dan energi kinetik (11). Energi total merupakan tujuan dari simulasi gelombang air dangkal untuk dapat memberikan manfaat pada kehidupan sehari-hari seperti pembangkit listrik. Persamaan untuk menghitung energi total yaitu :

$$\begin{aligned} E_W &= E_P + E_K, \\ E_W &= \frac{1}{2} w \rho g \bar{\eta}^2 + \frac{1}{2} w \rho g \bar{\eta}^2, \\ E_W &= w \rho g \bar{\eta}^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Daya listrik yaitu total energi gelombang laut yang dihasilkan tiap satu periode (T):

$$P_W = \frac{E_W}{T}. \quad (13)$$

5 HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Validasi Numerik

Untuk dapat mengetahui apakah metode *Lax-Friedrich* cocok untuk menghampiri solusi persamaan air dangkal, maka solusi numerik dibandingkan dengan solusi analitik *standing wave*. Solusi analitik dari persamaan (3) adalah:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{2} [\cos(\pi(x - ct)) + \cos(\pi(x + ct))]. \quad (14)$$

dengan c merupakan kecepatan gelombang yang dapat dihitung menggunakan persamaan (15) berikut ini:

$$c = \sqrt{gh}. \quad (15)$$

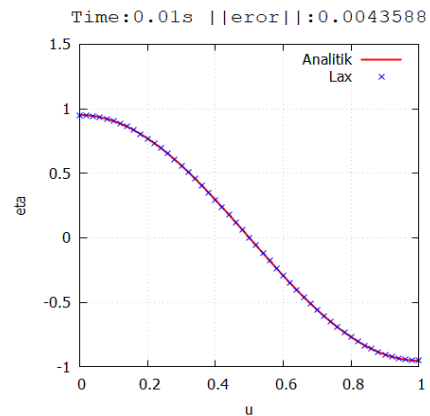
Galat yang dihasilkan dari penggunaan metode *Lax-Friedrich* dengan solusi analitik *standing wave* yaitu 0.32%. Hasil galat dapat

dilihat pada Tabel 1. Penelitian dilakukan dengan $\Delta x = 0.02$, $\Delta t = 0.002$, $N = 50$, $\eta(x, 0) = \cos(\pi x)$, dan u konstan. Tabel 1 menampilkan galat akumulatif setiap grid pada pengamatan di 10 iterasi awal.

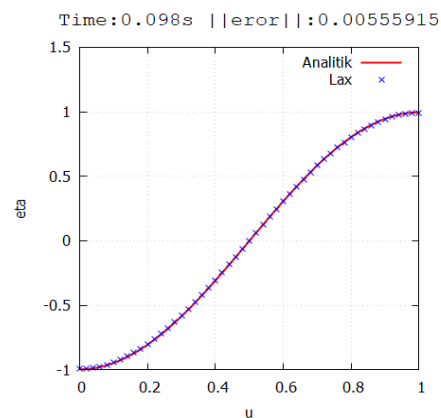
Tabel 1. Hasil galat metode *Lax-Friedrich* dengan solusi analitik *standing wave*.

Waktu	Galat (%)	Waktu	Galat (%)
0.002	0.21	0.012	0.44
0.004	0.32	0.014	0.45
0.006	0.38	0.016	0.45
0.008	0.41	0.018	0.45
0.01	0.43	0.02	0.45

Untuk melihat perbandingan dengan grafik, dapat dilihat pada Gambar 4,5.



Gambar 4. Hasil perbandingan pada waktu 0.01 detik dengan galat 0.43%.



Gambar 5. Hasil perbandingan pada waktu 0.098 detik dengan galat 0.55%.

Simulasi pada Gambar 4 dan 5 menjelaskan perbandingan dari solusi analitik (berwarna merah) dan metode *Lax-Friedrich* (berwarna biru). Dari grafik yang dihasilkan oleh metode *Lax-Friedrich* mirip dengan grafik yang dihasilkan oleh solusi analitik-nya. Sehingga, metode *Lax-Friedrich* dapat menghampiri solusi analitik dengan baik menyelesaikan masalah dalam kasus ini.

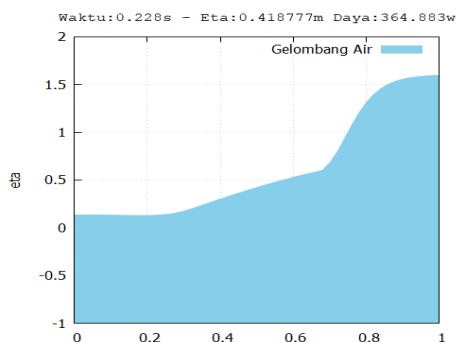
5.2 Aplikasi *Oscillating Water Column* (OWC)

Untuk mengaplikasikan metode *Lax-Friedrich* untuk *Oscillating Water Column* diperlukan beberapa inisiasi awal, berikut nilai inisiasi yang digunakan $w = 0.2$ meter, $\rho = 1030$ kg/meter³, $g = 9.81$ meter/detik, $T = 1$ detik, $\Delta t = 0.002$ detik, $\Delta x = 0.02$ meter, $N = 50$ titik dan untuk nilai awal η dan u saat $t = 0$, sebagai berikut:

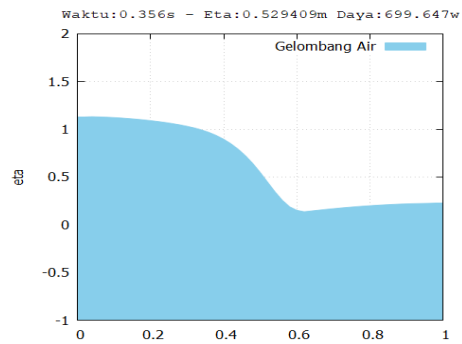
$$\eta(x, 0) = \sin\left(\frac{\pi x}{2}\right),$$

$$u(x, 0) = \sin(x).$$

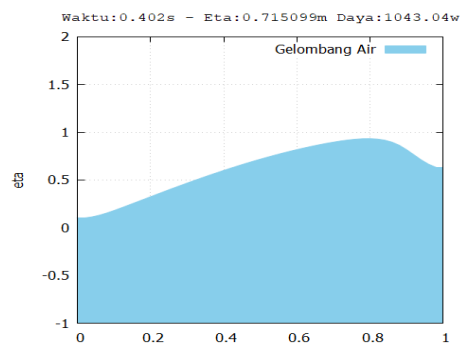
Hasil daya listrik yang didapat dari simulasi menggunakan metode *Lax-Friedrich* untuk OWC dapat dilihat pada Gambar 6,7,8,9. Diasumsikan letak ruang OWC pada titik 0.4 sampai 0.6 dikarenakan lembar ruang 0.2 meter, sehingga pengukuran energi ditinjau pada titik 0.4 sampai titik 0.6.



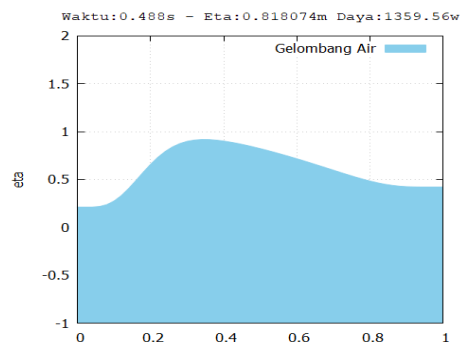
Gambar 6. Ketinggian air pada waktu 0.228 detik.



Gambar 7. Ketinggian air pada waktu 0.356 detik.



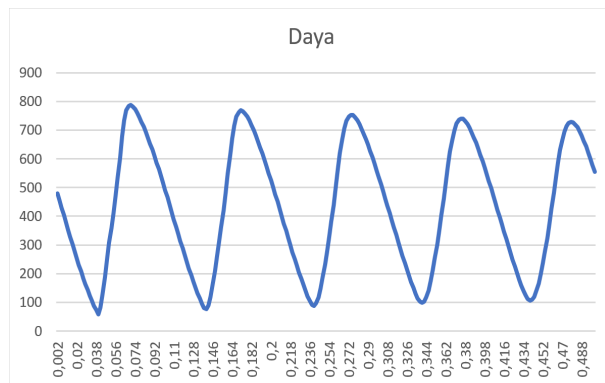
Gambar 8. Ketinggian air pada waktu 0.402 detik.



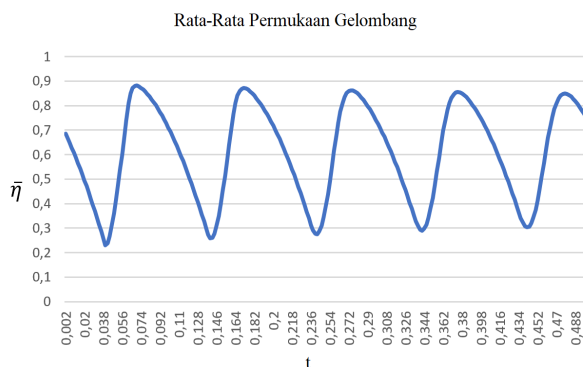
Gambar 9. Ketinggian air pada waktu 0.488 detik.

Gambar 6, 7, 8 dan 9 menjelaskan bahwa daya listrik yang dihasilkan, bergantung pada ketinggian gelombang air laut. Jika semakin tinggi permukaan gelombang air maka energi yang dikeluarkan semakin besar, sebanding dengan daya listrik yang dihasilkan. Untuk memudahkan melihat perbandingan daya listrik yang dihasilkan, dapat dilihat pada Gambar 10. Gambar 10 adalah grafik daya listrik yang dihasilkan gelombang berdasarkan waktu dan Gambar 11 adalah grafik tinggi gelom-

bang berdasarkan waktu.



Gambar 10. Grafik daya listrik gelombang berdasarkan waktu.



Gambar 11. Grafik rata-rata ketinggian gelombang pada daerah OWC berdasarkan waktu.

Dari hasil yang telah diketahui melalui Gambar 10 dan 11 tersebut, terlihat bahwa tinggi permukaan gelombang mempengaruhi besar daya listrik yang dihasilkan. Daya listrik terbesar yaitu 787.23 Watt pada permukaan gelombang di ketinggian rata-rata 0.881 meter dan daya listrik terkecil yaitu 58.363 Watt pada permukaan gelombang di ketinggian rata-rata 0.23 meter.

6 KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa potensi energi yang dihasilkan oleh gelombang untuk mendapatkan daya listrik tersebut bergantung dari ketinggian gelombang yang diben-

tuk oleh persamaan gelombang air dangkal dengan metode *Lax-Friedrich*. Rata-rata eror yang dihasilkan dari penggunaan metode *Lax-Friedrich* dengan solusi analitik *standing wave* yaitu 0.32%. Daya listrik terbesar yaitu 787.23 Watt pada permukaan gelombang di ketinggian rata-rata 0.881 meter dan daya listrik terkecil yaitu 58.363 Watt pada permukaan gelombang di ketinggian rata-rata 0.23 meter.

Daftar Pustaka

- Cushman-Roisin, B. (1994). *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall.
- Durrant, D. R. (2013). *Numerical methods for wave equations in geophysical fluid dynamics*, volume 32. Springer Science & Business Media.
- Gareev, A. (2011). Analysis of variable pitch air turbines for oscillating water column (owc) wave energy converters.
- Glaister, P. (1988). Approximate riemann solutions of the shallow water equations. *Journal of Hydraulic Research*, 26(3):293–306.
- Gunawan, P. H. and Lhébrard, X. (2015). Hydrostatic relaxation scheme for the 1d shallow water-exner equations in bedload transport. *Computers & Fluids*, 121:44–50.
- Jannah, R. (2016). *Penyelesaian numerik gelombang air dangkal linear ID dengan metode Lax-Friedrichs*. PhD thesis, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.
- Kämpf, J. (2010). *Advanced Ocean Modelling: Using Open-source Software*. Springer Science & Business Media.
- Kämpf, J. and Kämpf, J. (2009). Long waves in a channel. *Ocean Modelling for Beginners: Using Open-Source Software*, pages 65–89.
- Kantha, L. H. and Clayson, C. A. (2000). *Numerical models of oceans and oceanic processes*, volume 66. Academic press.

- Kolar, R., Gray, W. G., Westerink, J., and Luettich Jr, R. (1994). Shallow water modeling in spherical coordinates: Equation formulation, numerical implementation, and application. *Journal of Hydraulic Research*, 32(1):3–24.
- Leão, R. (2005). Wave power conversion systems for electrical energy production. *Department of Electrical Engineering Faculty of Science and Technology Noova University of Lisbon, Portugal*.
- Nielsen, K. (1987). On the performance of a wave power converter. In *Utilization of Ocean Waves—Wave to Energy Conversion*., pages 164–183. ASCE.
- Pontes, T. (2001). Ocean energies: Resources and utilisation. *World Energy Council*.
- Ross, D. (2012). *Energy from the Waves*. Elsevier.
- Strauss, W. A. (1992). *Partial differential equations*, volume 92. Wiley New York.
- Vining, J. (2005). Ocean wave energy conversion. *Advanced Independent study report electrical and Computer Engineering Department University of Wisconsin–Madison*.
- Wijaya, A. and Wayan, I. (2012). Pembangkit listrik tenaga gelombang laut menggunakan teknologi oscilating water column di perairan bali. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 9(2).