

Penerapan Analisis Dimensional pada Perubahan Tekanan Udara Perangkat *Oscillating Water Column* (OWC)

Jahirwan Ut Jasron*, Arifin Sanusi, Matheus M. Dwinanto, Kristomus Boimau, Yeremias M. Pell, Ben V. Tarigan, Gusnawati

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana

Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang, Nusa Tenggara Timur

*E-mail: jahirwan.jasron@staf.undana.ac.id

Abstract

Energy is a significant need in life in an increasingly sophisticated era. One of the renewable energy sources that are quite promising to be managed is ocean wave energy. An oscillating water column (OWC) is a device that can use to convert wave energy into mechanical energy, which can then convert into electrical energy. The energy harvesting process, in reality, involves many variables that influence each other and work simultaneously. Formulating n correlations between one variable and another group of variables can be solved by dimensional or statistical analysis. Dimensional analysis, in some instances, will be easier and relatively fast to find the results. The dimensional analysis used is the pi Buckingham method, and based on the results of the research obtained a correlation between the wave characteristics and the geometry of the air column on changes in air pressure in the OWC device column were the more significant the H/L and $m/a^2\rho$, the greater the difference in air pressure in the column. This functional relationship has a good match with the results of the experiments carried out.

Kata kunci: dimensional analysis, wave energy, OWC

Abstrak

Energi merupakan kebutuhan utama dalam kehidupan di era yang semakin canggih. Salah satu sumber energi terbarukan yang cukup menjanjikan untuk dikelola adalah energi gelombang laut. *Oscillating water column* (OWC) adalah salah satu perangkat yang dapat digunakan untuk mengkonversi energi gelombang menjadi energi mekanik yang seterusnya dapat menjadi energi listrik. Proses pemanenan energi dalam kenyataannya melibatkan banyak variabel yang saling mempengaruhi dan bekerja secara simultan. Untuk merumuskan n korelasi antara satu variabel dengan kelompok variabel lain dapat diselesaikan dengan analisis dimensi atau statistik. Analisis dimensi dalam hal tertentu akan lebih mudah dan relatif cepat untuk mengetahui hasilnya. Analisis dimensional yang digunakan adalah metode pi buchingham dan berdasarkan hasil analisis diperoleh korelasi antara karakteristik gelombang dan geometri kolom udara terhadap perubahan tekanan udara pada kolom perangkat OWC dimana semakin besar H/L dan $m/a^2\rho$ maka perubahan tekanan udara pada kolom akan semakin besar. Hubungan fungsional ini mempunyai kesesuaian yang baik terhadap hasil eksperimen yang dilakukan.

Kata kunci: analisis dimensi, energi gelombang, OWC

1. Pendahuluan

Kehidupan manusia di bumi dalam perkembangannya niscaya sulit dipisahkan dari kebutuhan tenaga listrik. Oleh karena itu penyediaan tenaga listrik bagi pembangunan yang berkelanjutan adalah tantangan utama yg dihadapi umat manusia. Kita semakin ditantang buat menemukan sumber energi baru, terutama sumber energi baru terbarukan. Energi gelombang laut merupakan adalah energi yang belum sepenuhnya dipergunakan. Dimasa mendatang, pemanfaatan tenaga ini menjadi krusial untuk digunakan sebagai tambahan bagi pemenuhan kebutuhan tenaga global terutama yang berada pada daerah kepulauan. Energi ini sangat mungkin dikelola, karena sanggup membangkitkan tenaga pada hampir seluruh wilayah laut yang ada di dunia.[1 - 5]

Salah satu cara untuk memanen energi laut adalah dengan membuat konversi energi melalui kolom air berosilasi (OWC) dengan sistem: gelombang masuk ke dalam ruang hidro-pneumatik (menyerupai gua dengan entri di bawah permukaan air) dan dari gerakan naik-turun di dalam kolom air membuat aliran dari ruang udara ke atmosfer dan, menggerakkan turbin udara yang ada pada saluran buang.[6]

Perubahan tekanan udara pada kolom udara perangkat *Oscillating Water Column* (OWC) dapat diartikan sebagai perubahan tinggi permukaan air didalam kolom udara yang menyebabkan terjadinya proses pemampatan udara. Proses pemampatan udara tersebut sangat mempengaruhi besarnya perubahan tekanan udara yang sekaligus menentukan laju

perpindahan udara keluar dari kolom udara. Perubahan tekanan udara tersebut pada dasarnya dipengaruhi oleh banyak sekali variabel yang saling berhubungan dan bekerja secara simultan.[7]

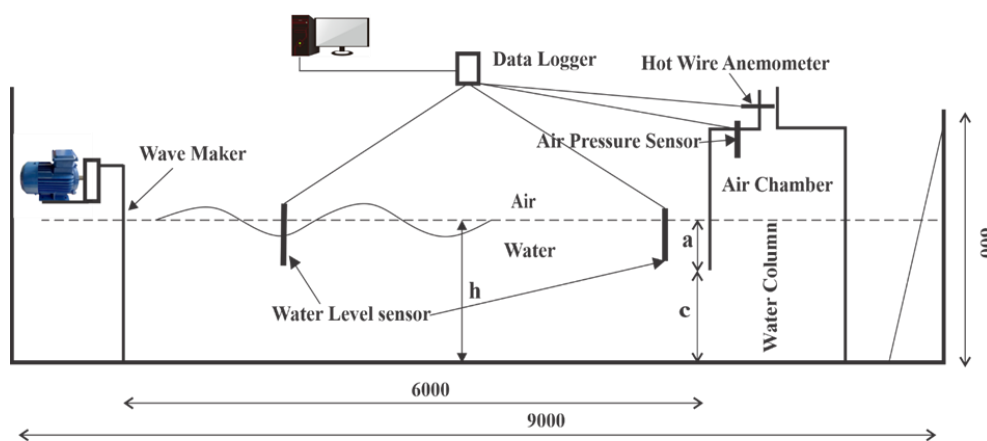
Banyak penelitian yang sudah dilakukan untuk meneliti efisiensi konversi energi gelombang laut dan kinerja sistem *oscillating water column* (OWC)[8 – 10], dan beberapa peneliti telah menerapkan metode numerik seperti BEM (Boundary Element Method), CFD (Computational Fluid Dynamics), dan MatLab. [11 – 15].

Pada penelitian ini digunakan analisis dimensional yang merupakan salah satu teknik matematika yang digunakan sebagai alat bantu untuk memecahkan berbagai masalah rekayasa fenomena fisik dalam hal ini dapat diwakili oleh persamaan yang terdiri dari variabel, baik berdimensi dan tanpa dimensi.[16] Analisis dimensional membantu menentukan susunan sistematis dari variabel dalam hubungan fisik dan kombinasi variabel berdimensi dengan parameter tak berdimensi. Khususnya pada pemodelan *oscillating water column* akan sulit untuk menentukan banyak variabel dependen dan variabel independen, dan juga sulit untuk menentukan korelasinya. Jika menggunakan analisis dimensional, maka mudah untuk mencari dan menentukan korelasi antar variabel. yang diinginkan. Menggunakan analisis dimensi yang baik dapat menentukan korelasi antara variabel dalam uji model *oscillating water column* selama data variabel akurat. Hubungan fungsional hasil analisis dimensional kemudian divalidasi dengan hasil eksperimen dengan menguji beberapa karakteristik gelombang dan geometri kolom perangkat *oscillating water column* (OWC)

2. Material dan metode penelitian

Penelitian ini akan menggunakan metode eksperimen nyata dengan menguji model rancangan perangkat *oscillating water column* (OWC) yang merupakan model fisik penerapan analisis dimensional. Analisis dimensional dilakukan dengan metode Buckingham. Metode Buckingham adalah salah satu metode dalam menentukan bilangan tak berdimensi.

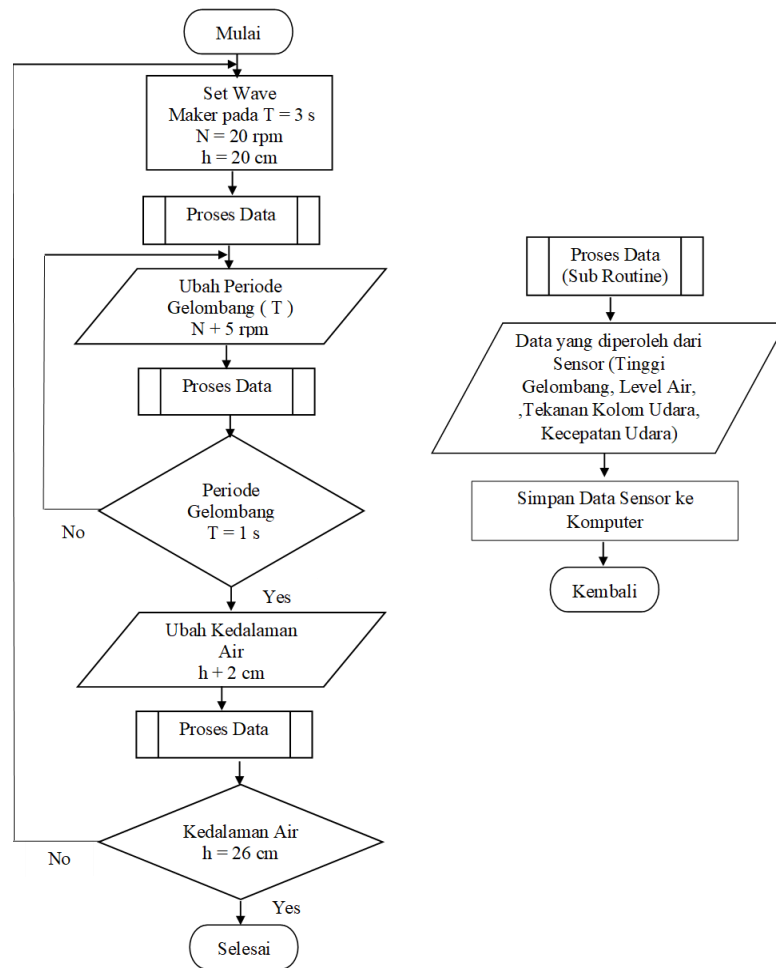
Pengujian model untuk penentuan korelasi antara karakteristik gelombang dan geometri perangkat *oscillating water column* terhadap perubahan tekanan udara dalam kolom dilaksanakan pada laboratorium mesin-mesin fluida jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya menggunakan alat uji wave flume yang dilengkapi dengan wave maker seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. berikut :



Gambar 1. Skema alat uji

Pengujian dimulai dengan pemasangan alat uji yang dirangkai sesuai dengan fungsinya masing-masing. Semua alat uji yang terpasang harus sudah dipastikan telah berfungsi dengan baik. Untuk menghasilkan gelombang dengan amplitudo gelombang yang diinginkan atur kecepatan dan panjang langkah wave maker. Ukur panjang gelombang, tinggi gelombang, dan periode gelombang yang dihasilkan. Tekanan air masuk untuk masing-masing kolom air diukur menggunakan pressure gauge yang waktu pengukurannya dilakukan pada periode gelombang yang sudah ditentukan. Perpindahan muka air akibat gelombang pada kolom udara diukur menurut skala yang terpasang pada perangkat. Perubahan tekanan udara pada kolom udara akibat perpindahan muka air diukur menggunakan pressure gauge yang waktu pengukurannya dilakukan bersamaan dengan pengukuran tekanan air masuk pada kolom air. Akibat perubahan tekanan udara pada kolom udara maka terjadi perpindahan udara dari kolom udara keluar melalui saluran buang yang kecepatan perpindahan udara diukur menggunakan anemometer.

Berikut prosedur pengambilan data dalam bentuk flow chart.



Gambar 2. Flow chart pengujian model fisik

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk keperluan analisis perubahan tekanan udara dalam kolom maka terlebih dahulu ditentukan variable-variabel utama yang mempengaruhi perubahan tersebut.

3.1 Variabel utama karakteristik gelombang dan geometri kolom OWC

Variabel-variabel utama karakteristik gelombang dan geometri kolom udara yang diperhitungkan mempengaruhi perubahan tekanan udara dalam kolom ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut :

Tabel 1. Variabel utama karakteristik gelombang

No.	Variabel Utama	Notasi	Satuan	Dimensi
1.	Panjang Gelombang	L	meter	L
2.	Tinggi Gelombang	H	meter	L
3.	Kecepatan Gelombang	C	Meter/detik	LT ⁻¹
4.	Energi gelombang	E	Joule	ML ² T ⁻²
5.	Tekanan Udara	p	Newton/m ²	ML ⁻¹ T ⁻²

Tabel 2. Variabel utama geometri kolom OWC

No.	Variabel Utama	Notasi	Satuan	Dimensi
1.	Dinding depan yang terendam	a	meter	L
2.	Massa Air dalam Kolom	m	kilogram	M
3.	Percepatan Gravitasi	g	Meter/detik ²	LT ⁻²
4.	Massa jenis	ρ	Kg/meter kubik	ML ⁻³
5.	Tekanan Udara	p	Newton/m ²	ML ⁻¹ T ⁻²

3.2 Analisis dimensional karakteristik gelombang terhadap perubahan tekanan udara dalam kolom

Penyelidikan perubahan tekanan udara pada perangkat oscillating water column dilakukan berdasarkan variable-variabel utama yang mempengaruhi perubahan dimaksud. Variabel-variabel utama sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1 diatas kemudian dianalisis menggunakan metode Pi Buchingham. Berdasarkan variable utama yang ada maka hubungan antar variable tersebut secara fungsional ditulis sebagai :

$$\Delta p = f(L, H, C, E) \tag{1}$$

atau dapat ditulis dalam bentuk :

$$g(\Delta p, L, H, C, E) = 0 \tag{2}$$

Dari persamaan fungsional diatas terlihat bahwa ada 5 (lima) besaran fisis dengan 3 (tiga) satuan dasar, sehingga diperoleh 2 (dua) suku tak berdimensi π , yang ditulis dalam bentuk persamaan :

$$\pi_1 = L^{a_1} C^{b_1} E^{c_1} \Delta p$$

$$\pi_2 = L^{a_2} C^{b_2} E^{c_2} H$$

atau dalam bentuk dimensi ditulis sebagai :

$$\pi_1 = [L]^{a_1} [LT^{-1}]^{b_1} [ML^2T^{-2}]^{c_1} [ML^{-1}T^{-2}]$$

$$\pi_2 = [L]^{a_2} [LT^{-1}]^{b_2} [ML^2T^{-2}]^{c_2} [L]$$

Karena π adalah nondimensional maka persamaan diatas bagian kanan harus juga nondimensional. Hal ini berarti pangkat dari dimensi M, L dan T semua harus sama dengan nol, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

Untuk π_1 :

$$[L^0 M^0 T^0] = [L]^{a_1} [LT^{-1}]^{b_1} [ML^2T^{-2}]^{c_1} [ML^{-1}T^{-2}]$$

$$L ; 0 = a_1 - b_1 + 2c_1 - 1$$

$$M ; 0 = c_1 + 1$$

$$T ; 0 = -b_1 - 2c_1 - 2$$

Maka diperoleh faktor nondimensional :

$$\pi_1 = \frac{L^3}{E} \Delta p \tag{3}$$

Untuk π_2 :

$$[L^0 M^0 T^0] = [L]^{a_2} [LT^{-1}]^{b_2} [ML^2T^{-2}]^{c_2} [L]$$

$$L ; 0 = a_2 + b_2 + 2c_2 + 1$$

$$M ; 0 = c_2$$

$$T ; 0 = -b_2 - 2c_2$$

Maka diperoleh faktor nondimensional :

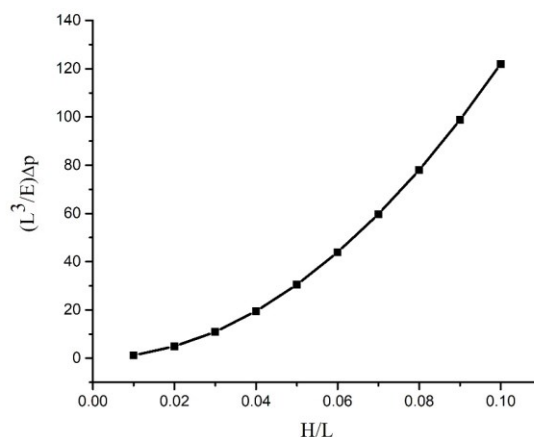
$$\pi_2 = \frac{H}{L}$$

Berdasarkan faktor nondimensinal yang sudah diperoleh, maka dihasilkan hubungan fungsional yang ditulis sebagai :

$$\pi_1 = f(\pi_2)$$

$$\frac{L^3}{E} \Delta p = f\left(\frac{H}{L}\right) \tag{4}$$

yang secara grafis disajikan pada Gambar 3. berikut.



Gambar 3. Hubungan fungsional karakteristik gelombang terhadap perubahan tekanan udara

3.3 Analisis dimensional geometri kolom OWC terhadap perubahan tekanan udara dalam kolom

Penyelidikan perubahan tekanan udara pada perangkat oscillating water column selanjutnya dilakukan berdasarkan variable-variabel utama yang mempengaruhi perubahan dimaksud dari sisi geometri kolom perangkat OWC. Variabel-variabel utama sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2 diatas kemudian dianalisis menggunakan metode Pi Buchingham. Berdasarkan variable utama yang ada maka hubungan antar variable tersebut secara fungsional ditulis sebagai :

$$\Delta p = f(a, m, g, \rho) \quad (5)$$

atau dapat ditulis dalam bentuk :

$$g(\Delta p, a, m, g, \rho) = 0 \quad (6)$$

Dari persamaan fungsional diatas terlihat bahwa ada 5 (lima) besaran fisis dengan 3 (tiga) satuan dasar, sehingga diperoleh 2 (dua) suku tak berdimensi π , yang ditulis dalam bentuk persamaan :

$$\pi_1 = a^{a_1} g^{b_1} \rho^{c_1} \Delta p$$

$$\pi_2 = a^{a_2} g^{b_2} \rho^{c_2} m$$

atau dalam bentuk dimensi ditulis sebagai :

$$\pi_1 = [L]^{a_1} [LT^{-2}]^{b_1} [ML^{-3}]^{c_1} [ML^{-1}T^{-2}]$$

$$\pi_2 = [L]^{a_2} [LT^{-2}]^{b_2} [ML^{-3}]^{c_2} [M]$$

Karena π adalah nondimensional maka persamaan diatas bagian kanan harus juga nondimensional. Hal ini berarti pangkat dari dimensi M, L dan T semua harus sama dengan nol, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

Untuk π_1 :

$$[L^0 M^0 T^0] = [L]^{a_1} [LT^{-2}]^{b_1} [ML^{-3}]^{c_1} [ML^{-1}T^{-2}]$$

$$L ; 0 = a_1 + b_1 - 3c_1 - 1$$

$$M ; 0 = c_1 + 1$$

$$T ; 0 = -2b_1 - 2$$

Sehingga diperoleh ;

$$a_1 = -1$$

$$b_1 = -1$$

$$c_1 = -1$$

Maka diperoleh faktor nondimensional :

$$\pi_1 = a^{a_1} g^{b_1} \rho^{c_1} \Delta p$$

Atau :

$$\pi_1 = \frac{\Delta p}{ag\rho} \quad (7)$$

Untuk π_2 :

$$[L^0 M^0 T^0] = [L]^{a_2} [LT^{-2}]^{b_2} [ML^{-3}]^{c_2} [M]$$

$$L ; 0 = a_2 + b_2 - 3c_2$$

$$M ; 0 = c_2 + 1$$

$$T ; 0 = -2b_2$$

Sehingga diperoleh ;

$$a_2 = -3$$

$$b_2 = 0$$

$$c_2 = -1$$

Maka diperoleh faktor nondimensional :

$$\pi_2 = [L]^{-3} [LT^{-2}]^0 [ML^{-3}]^{-1} [M]$$

Atau :

$$\pi_2 = \frac{m}{a^3 \rho} \quad (8)$$

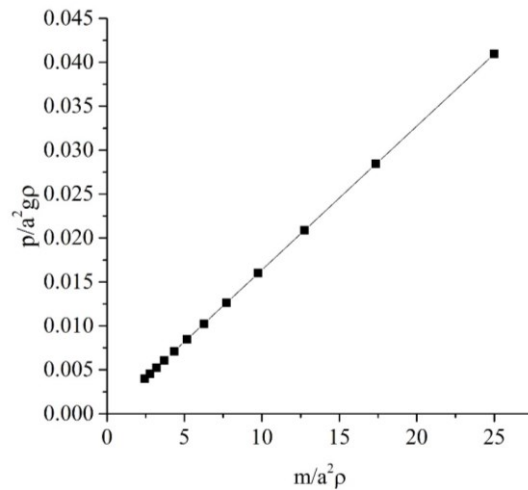
Berdasarkan faktor nondimensional yang sudah diperoleh, maka dihasilkan hubungan fungsional yang ditulis sebagai :

$$\pi_1 = f(\pi_2)$$

$$\frac{\Delta p}{ag\rho} = f\left(\frac{m}{a^3 \rho}\right)$$

(9)

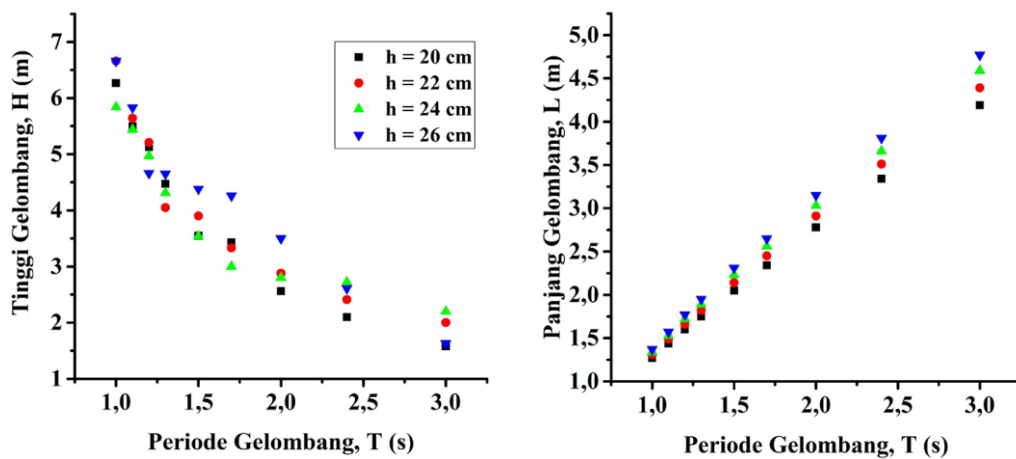
yang secara grafis disajikan pada Gambar 4. berikut.



Gambar 4. Hubungan fungsional geometri kolom terhadap perubahan tekanan udara

3.4 Pengujian model perangkat *Oscillating Water Column (OWC)*

Perubahan tekanan udara dalam kolom pada dasarnya disebabkan oleh gerakan naik turunnya permukaan air di dalam kolom akibat gaya eksitasi gelombang. Berdasarkan data hasil pengujian yang dilakukan dengan fasilitas kanal terbuka yang dilengkapi dengan pembuat gelombang diperoleh data tinggi dan panjang gelombang, serta data perubahan tekanan udara pada kolom udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Tinggi dan Panjang Gelombang

Berdasarkan hasil analisis dimensional karakteristik gelombang terhadap perubahan tekanan udara dalam kolom OWC yang ditulis dalam bentuk:

$$\frac{L^3}{E} \Delta p = f\left(\frac{H}{L}\right)$$

selanjutnya diperiksa hubungan fungsional karakteristik gelombang terhadap perubahan tekanan udara. Hubungan baru dapat dituliskan sebagai :

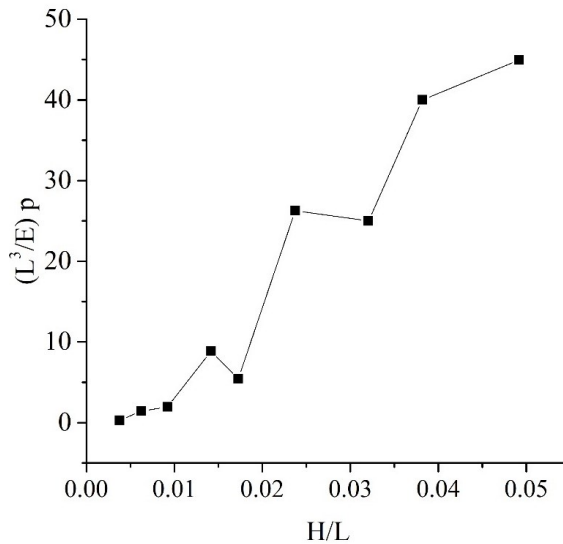
$$f_1 = \left(\frac{L^3}{E} \Delta p, \frac{H}{L} \right) = 0$$

Sehingga perubahan tekanan udara yang terjadi dapat ditulis menjadi :

$$\Delta p = \frac{\rho g H^2}{8 L^2} f_2 \left(\frac{H}{L} \right) \tag{10}$$

Dengan demikian perubahan tekanan udara dalam kolom perangkat OWC dengan data awal tinggi gelombang (H), panjang gelombang (L), kecepatan gelombang (C), dan energi gelombang (E), dalam eksperimen selanjutnya cukup menyertakan tinggi dan panjang gelombang serta sebuah faktor fungsional lainnya dalam hal ini kedalaman air (h).

Berdasarkan data hasil pengujian yang sudah didapatkan, maka selanjutnya dilakukan validasi terhadap hasil analisis dimensional seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. berikut.



Gambar 6. Hubungan fungsional hasil eksperimen untuk faktor fungsional $h = 20$ cm

Selanjutnya berdasarkan hasil analisis dimensional geometri perangkat oscillating water column terhadap perubahan tekanan udara dalam kolom OWC yang ditulis dalam bentuk :

$$\frac{\Delta p}{ag\rho} = f\left(\frac{m}{a^3\rho}\right)$$

Hubungan tersebut dapat ditulis Kembali dalam bentuk :

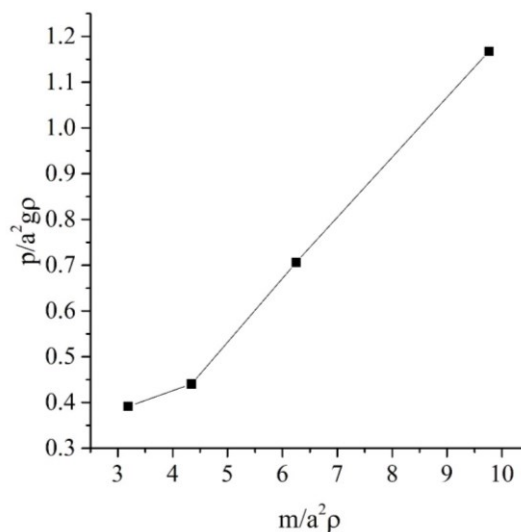
$$f_1 = \left(\frac{\Delta p}{ag\rho}, \frac{m}{a^3\rho}\right) = 0$$

Sehingga perubahan tekanan udara dapat ditulis menjadi :

$$\Delta p = ag\rho f_2\left(\frac{m}{a^3\rho}\right) \tag{11}$$

Dari persamaan fungsional di atas dapat dijelaskan bahwa perubahan tekanan udara pada kolom perangkat OWC sangat dipengaruhi oleh panjang dinding depan yang terendam (a). Karena itu variabel ini akan menjadi perhatian utama dalam perancangan eksperimen yang akan dilakukan. Namun perlu juga diperhatikan bahwa masih terdapat satu fungsi lain yang berpengaruh yang dalam hal ini ditetapkan sebagai fungsi dari kedalaman air (h).

Dari hasil eksperimen yang dilakukan, telah diperoleh data perubahan tekanan udara yang dihubungkan dengan variable panjang dinding depan yang terendam sebagai faktor utama yang merupakan validasi terhadap hasil analisis dimensional seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. berikut.



Gambar 7. Hubungan fungsional hasil eksperimen untuk faktor fungsional $h = 20$ cm

Dari Gambar 7 tersebut terlihat bahwa kecenderungan perubahan tekanan udara dalam hubungan fungsional terhadap panjang dinding depan yang terendam sudah sesuai. Hal ini berarti karakteristik geometri perangkat OWC hasil analisis dimensional dengan variabel utama panjang dinding depan yang terendam telah tepat. Untuk mendapatkan hubungan yang lebih akurat tentu harus juga diperhatikan fungsi lainnya yaitu yang berhubungan dengan kedalaman air.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian analisis dimensional perubahan tekanan udara pada perangkat *oscillating water column* (OWC) diperoleh simpulan bahwa variabel utama tinggi dan panjang gelombang sebagai hasil analisis dimensional karakteristik gelombang telah menunjukkan hubungan fungsional yang sesuai dengan hasil eksperimen dimana diperoleh bahwa semakin besar nilai H/L akan meningkatkan perubahan tekanan udara di dalam kolom sedangkan untuk variabel utama panjang dinding yang terendam sebagai hasil analisis dimensional geometri perangkat OWC telah menunjukkan hubungan fungsional yang sesuai dengan hasil eksperimen dimana diperoleh bahwa semakin besar panjang dinding maka akan mengakibatkan penurunan perubahan tekanan udara dalam kolom. Namun demikian harus tetap memperhatikan fungsi kedalaman air yang dapat mempengaruhi hasil perubahan tekanan udara tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana yang telah memberi dukungan dana dalam penelitian, ini melalui dana DIPA Universitas Nusa Cendana No.SP-DIPA 023.17.2.677528/2022.

Daftar Pustaka

- [1] Jasron JU, Soeparman S, Yuliati L, Darmadi DB. Experimental Study on the Effect of Ocean Wave Characteristics on Air Pressure in Oscillating Water Column Device. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2019;494(1).
- [2] Bautista EG, Méndez F, Bautista O. Numerical Predictions of the Generated Work in an Air-Compression Chamber Driven by an Oscillating Water Column. 2009;7–16.
- [3] Nader JR, Zhu SP, Cooper P. Hydrodynamic and energetic properties of a finite array of fixed oscillating water column wave energy converters. Ocean Eng [Internet]. 2014;88:131–48. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.06.022>
- [4] Ning DZ, Wang RQ, Zou QP, Teng B. An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter. Appl Energy. 2016;168:636–48.
- [5] John Ashlin S, Sundar V, Sannasiraj SA. Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristics. Renew Energy. 2016;96:341–53.
- [6] Bouali B, Larbi S. Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter. Energy Procedia [Internet]. 2013;36:565–73. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.065>
- [7] Çelik A, Altunkaynak A. Experimental and analytical investigation on chamber water surface fluctuations and motion behaviours of water column type wave energy converter. Ocean Eng. 2018;150(December 2017):209–20.
- [8] Jasron JU, Soeparmani S, Yuliati L, Darmadi DB. Comparison of the performance of oscillating water column devices based on arrangements of water columns. J Mech Eng Sci. 2020;14(3):7082–93.
- [9] Elhanafi A, Macfarlane G, Fleming A, Leong Z. Experimental and numerical measurements of wave forces on a 3D offshore stationary OWC wave energy converter. Ocean Eng. 2017;144.
- [10] Rezanejad K, Guedes Soares C, López I, Carballo R. Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter. Renew Energy. 2017;106.
- [11] Filianoti PGF, Gurnari L, Torresi M, Camporeale SM. CFD analysis of the energy conversion process in a fixed oscillating water column (OWC) device with a Wells turbine. In: Energy Procedia. 2018.
- [12] Kamath A, Bihs H, Arntsen ØA. Numerical modeling of power take-off damping in an oscillating water column device. Int J Mar Energy. 2015;10.
- [13] Elhanafi A, Fleming A, Macfarlane G, Leong Z. Numerical hydrodynamic analysis of an offshore stationary–floating oscillating water column–wave energy converter using CFD. Int J Nav Archit Ocean Eng. 2017;9(1).
- [14] Vyzikas T, Deshoulières S, Giroux O, Barton M, Greaves D. Numerical study of fixed Oscillating Water Column with RANS-type two-phase CFD model. Renew Energy. 2017;102.
- [15] Delauré YMC, Lewis A. 3D hydrodynamic modelling of fixed oscillating water column wave power plant by a boundary element methods. Ocean Eng. 2003;30(3):309–30.
- [16] J.C. Gibbins, 2011, “Dimensional Analysis”, Springer London Dordrecht Heidelberg New York