

Studi Numerik Pengaruh Geometri Dasar Laut Berbentuk *Convex* Terhadap Performa Hidrodinamis *Oscillating Water Column* (OWC) pada Gelombang Pendek

Wahyu Nur Fadilah^{a,*}, Sony Junianto^a, Nu Rhahida Arini^a, Joke Pratilastiarso^a

^aProgram Studi Sarjana Terapan Sistem Pembangkit Energi, Departemen Teknik Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya, 60111

*E-mail: wahyunur@pens.ac.id

Abstract

The vast ocean holds great energy potential in ocean waves, providing a potential solution to the fossil fuel crisis. Wave Energy Converters (WECs) play an important role in optimizing this potential, with the Oscillating Water Column (OWC) being the most promising device with a simple construction. This research explores the hydrodynamic complexity of OWCs, focusing on the effect of convex bottom profiles on energy capture efficiency, especially in the face of irregular and natural ocean waves. Two-dimensional (2D) numerical simulations are used to analyze the hydrodynamic performance of OWCs at low frequency or short waves. The uniqueness of this study lies in the variation of the convex radius width, with the tested values being 1; 1.5; 2; 2.5; 3; and 3.5 meters. Numerical analysis shows that there is a significant decrease in hydrodynamic performance when the radius width is more than 2.5 meters. The results of this study recommend that in order to obtain optimal hydrodynamic performance and better than the flat bottom profile, the convex radius width should not be more than 75% of the water depth.

Keywords: cfd; convex bottom profile; hydrodynamic performance; oscillating water column (owc)

Abstrak

Lautan yang luas menyimpan potensi energi yang besar dalam gelombang laut, menjadi solusi potensial terhadap krisis bahan bakar fosil. *Wave Energy Converters* (WECs) memegang peranan penting dalam mengoptimalkan potensi ini, dengan *Oscillating Water Column* (OWC) menjadi perangkat yang paling menjanjikan dan memiliki konstruksi yang sederhana. Penelitian ini mengeksplorasi kompleksitas hidrodinamis OWC, dengan fokus pada pengaruh profil dasar berbentuk *convex* terhadap efisiensi penangkapan energi, terutama dalam menghadapi gelombang laut yang tidak teratur dan alami. Simulasi numerik dua dimensi (2D) digunakan untuk menganalisis performa hidrodinamis OWC pada frekuensi rendah atau gelombang pendek. Keunikan penelitian ini terletak pada variasi lebar radius *convex*, dengan nilai yang diuji adalah 1; 1.5; 2; 2.5; 3; dan 3.5 meter. Analisa numerik menunjukkan terdapat penurunan performa hidrodinamis yang cukup signifikan ketika lebar radius bernilai lebih dari 2.5 meter. Hasil studi ini merekomendasikan bahwa untuk mendapatkan performa hidrodinamis yang optimal dan lebih baik dibandingkan dengan profil dasar berbentuk datar, lebar radius *convex* sebaiknya tidak bernilai lebih dari 75% dari kedalaman air.

Kata kunci: CFD; *oscillating water column* (OWC); performa hidrodinamis; profil dasar *convex*

1. Pendahuluan

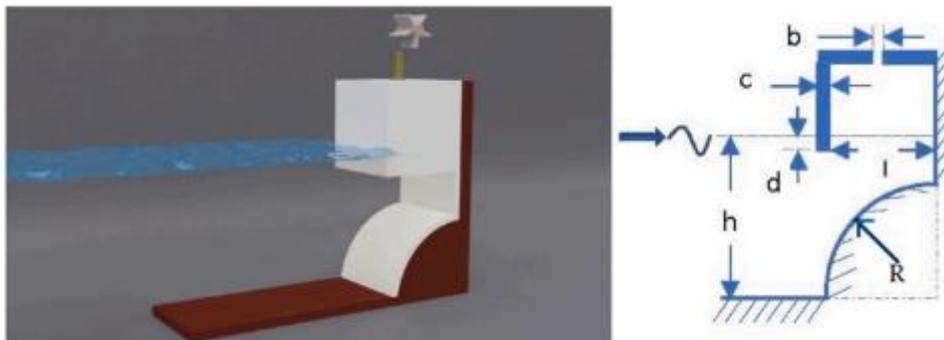
Lautan yang luas mengandung sejumlah besar potensi energi dalam bentuk gelombang laut, yang dapat dimanfaatkan dengan teknologi yang sesuai untuk mengatasi krisis bahan bakar fosil [1–3]. Menurut prinsip kerjanya, perangkat konverter energi gelombang laut (*Wave Energy Converters*/WECs) dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu *the Oscillating Water Column* (OWC), *The Overtopping Device* [4] dan *The Oscillating Bodies* [5]. Kinerja dan tingkat keandalan yang tinggi menjadikan OWC salah satu perangkat yang paling menjanjikan dan memiliki cara operasi serta konstruksi yang sederhana [6]. Kontruksi OWC meliputi rotor turbin yang terletak di atas permukaan air yang berputar dengan kecepatan yang relatif tinggi dan secara langsung menggerakkan generator listrik konvensional [1]. Perangkat OWC pada dasarnya terdiri dari sebuah ruang yang terbuka ke laut pada bagian bawahnya dan memiliki sebuah sisi terbuka dengan ukuran kecil di bagian atasnya. Air laut akan memasuki ruang melalui bagian bawah dan membentuk kolom air yang memenuhi sebagian ruangan dan sebagian lainnya terisi dengan udara. Kolom air akan naik dan turun di dalam ruang setiap gelombang datang dan surut. Gerakan kolom air tersebut mendorong udara melalui saluran untuk menggerakkan turbin udara.

Banyak studi telah dilakukan mengenai *Oscillating Water Column* (OWC), mulai dari skala laboratorium hingga penerapan di dunia nyata [7 – 9]. Pengujian skala laboratorium telah dilakukan untuk beragam struktur perangkat OWC, serta berbagai kondisi gelombang dan parameter dasar laut [8 – 10]. Dalam semua penelitian yang disebutkan, evaluasi kinerja hidrodinamika dan efisiensi perangkat OWC dilakukan dalam situasi gelombang yang standar. Namun, pada situasi sebenarnya, gelombang laut cenderung tidak teratur dan memiliki sifat acak yang alamiah. Dari hal tersebut dapat disimpulkan bahwa profil dasar OWC menjadi fokus dalam mengatasi gelombang laut yang tidak tentu agar efisiensi penangkapan energi tetap terjaga dan meningkat. Peningkatan efisiensi dari OWC dapat dilakukan dengan memodifikasi bentuk profil dasarnya. Terdapat beberapa bentuk modifikasi profil dasar OWC, seperti bentuk *classic*, *stepped – bottom*, *U – shaped*, *L – shaped*, *convex*, *concave*, dan *sloped step* [2, 11]. Mohapatra, dkk. [2] pada penelitiannya melakukan analisa numerik untuk mengetahui pengaruh bentuk profil dasar *convex*, *concave*, dan *sloped step* terhadap performa hidrodinamis OWC. Penelitian tersebut menunjukkan OWC dengan profil dasar berbentuk *convex* menghasilkan peningkatan efisiensi yang substansial untuk rentang frekuensi sub – optimal pada lebar radius 2 dan 3 meter. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk *convex* memiliki performa hidrodinamis yang lebih baik dibandingkan bentuk *concave*, *sloped step*, dan datar terutama pada frekuensi rendah atau gelombang pendek [2].

Pada penelitian ini, sebuah model dua dimensi (2D) dibuat dan disimulasikan secara numerik untuk mengetahui performa hidrodinamis dari perangkat OWC pada frekuensi rendah atau gelombang pendek. Analisa perangkat OWC dalam kondisi laut yang berombak dimungkinkan melalui data resolusi tinggi yang dihasilkan oleh simulasi numerik [12]. Kebaruan yang ditawarkan pada penelitian ini adalah lebar radius bentuk *convex* yang lebih beragam. Terdapat 6 model yang akan diuji, yaitu bentuk *convex* dengan lebar radius 1; 1.5; 2; 2.5; 3; dan 3.5 meter. Variasi lebar radius bentuk *convex* dilakukan untuk melihat pengaruh lebar radius bentuk *convex* secara lebih dalam terhadap performa hidrodinamis OWC. Selain performa hidrodinamis OWC, data kecepatan pada saluran diatas kolom udara dan tekanan pada kolom juga diberikan.

2. Material dan Metode Penelitian

Pada penelitian ini, OWC dengan profil dasar berbentuk *convex* disimulasikan secara numerik. Variasi dilakukan bentuk *convex* dengan lebar radius sebesar 1; 1.5; 2; 2.5; 3; dan 3.5 meter.



Gambar 1. Geometri OWC dengan Profil Dasar Berbentuk *Convex* [2]

2.1. Geometri OWC

Analisa numerik dilakukan pada OWC dengan fluida dua fasa inkompresibel yang bergantung pada waktu dengan menggunakan metode *computational fluid dynamics* (CFD) dua dimensi (2D). Geometri dan parameter geometri OWC dengan dasar tangki/laut berbentuk *convex*, sesuai dengan penelitian Mohapatra, dkk.[2], ditampilkan pada Gambar 1 dan Tabel 1. Panjang OWC dipilih sedemikian rupa sehingga pantulan dari ujung lainnya tidak menyentuh zona pembuat gelombang dan menyebabkan superposisi gelombang. Air pada OWC diatur dengan kedalaman 4 meter dan batas atas dari OWC berada pada jarak 8 meter dari dasar tangki/laut. Batas atas dari domain 2D didefinisikan sebagai *pressure outlet* dengan kondisi tekanan atmosfer. Batas bawah, kanan, bagian kolom, dan bagian *convex* didefinisikan sebagai *wall*. Gelombang dengan tinggi 0.1 meter dan periode 1.8 sekon digunakan sebagai masukan (*input*) kecepatan pada batas kiri. Lebar radius bentuk *convex* yang digunakan pada penelitian ini adalah 1; 1.5; 2; 2.5; 3; dan 3.5 meter.

Tabel 1. Parameter Geometri OWC

Parameter	Nilai (Meter)	Keterangan
h	4	Kedalaman air
l	1	Panjang kolom OWC
d	0.25	Panjang dinding depan OWC
b	0.1	Lebar saluran atas kolom
c	0.2	Tebal dinding kolom
H	0.1	Tinggi gelombang

2.2. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan sebuah metode numerik yang digunakan untuk menganalisa dan memprediksi fenomena yang terjadi pada suatu aliran fluida, baik dari segi perpindahan panas, perpindahan massa, dan permasalahan lain yang berhubungan. Pada penelitian ini permasalahan pada fluida diselesaikan dengan menggunakan beberapa persamaan meliputi Persamaan Kontinuitas dan Persamaan Konservasi Momentum atau Persamaan Navier – Stokes. Persamaan Kontinuitas adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

dimana ρ adalah densitas fluida, t adalah waktu, dan \vec{v} adalah vektor kecepatan total. Kemudian Persamaan Konservasi Momentum atau dapat disebut sebagai Persamaan Navier – Stokes adalah sebagai berikut:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\sigma} \tag{2}$$

dimana ρ adalah densitas fluida, t adalah waktu, \vec{v} adalah vektor kecepatan total, p adalah tekanan statis, dan $\vec{\sigma}$ adalah vektor tegangan viskos normal total.

Metode *mixture* dipilih untuk menghitung fraksi volume fluida dengan fasa yang berbeda tiap volume kontrol. Harus dicatat bahwa jumlah fraksi volume dari semua fasa dalam volume kontrol adalah sebuah kesatuan dan fraksi volume primer akan dihitung berdasarkan batasan berikut [2]:

$$\sum_{i=1}^n q_i = 1 \tag{3}$$

Pemodelan viskositas $k - \epsilon$ dan algoritma SIMPLE digunakan untuk mencapai kondisi pasangan tekanan – kecepatan. Formulasi kondisi *transient* implisit orde pertama dipilih untuk mendiskritisasi persamaan pada domain waktu. PRESTO dan skema QUICK digunakan sebagai untuk diskritisasi spasial pada tekanan dan momentum.

2.3. Performa Hidrodinamis OWC

Performa hidrodinamis perangkat OWC dinilai berdasarkan dari efisiensi hidrodinamis perangkat OWC. Daya yang tersedia pada turbin dan dihasilkan oleh perangkat OWC disebut sebagai P_{out} dan daya gelombang disebut sebagai P_{in} . P_{out} didefinisikan sebagai rata – rata tekanan pada kolom, p_c , dan volume udara yang melewati sisi terbuka pada bagian atas kolom, q , terhadap waktu. Persamaan untuk P_{out} adalah sebagai berikut:

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T p_c(t) q(t) dt \tag{4}$$

dimana T adalah periode, p_c adalah tekanan pada kolom, dan q adalah volume udara yang melewati saluran pada bagian atas kolom. Kemudian persamaan untuk P_{in} adalah sebagai berikut:

$$P_{in} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\omega}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] \tag{5}$$

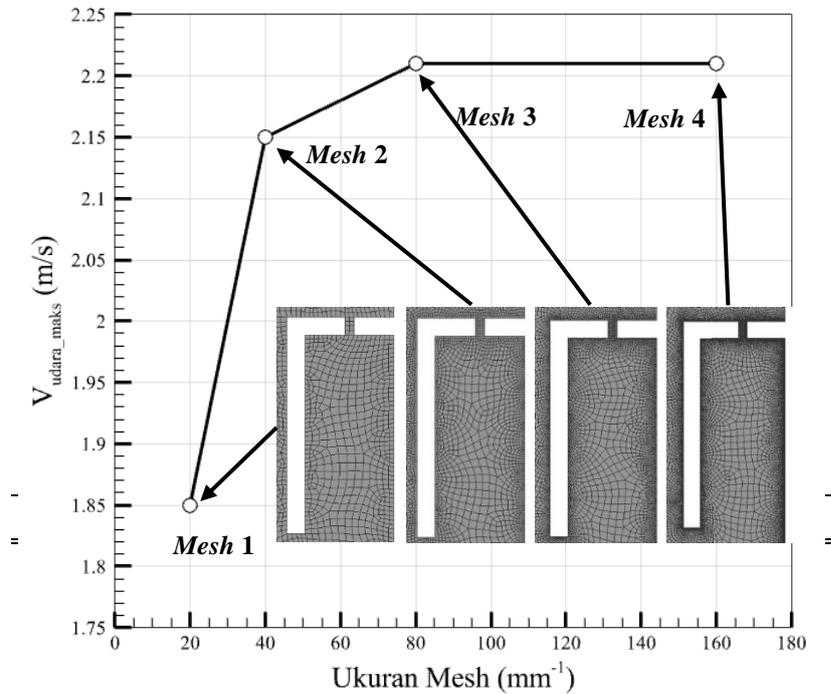
dimana ρ adalah densitas fluida, g adalah percepatan gravitasi, H adalah tinggi gelombang, ω adalah frekuensi angular, k adalah nomor gelombang, dan h adalah kedalaman air. Untuk mencari efisiensi hidrodinamis perangkat OWC dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{6}$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Independensi Grid

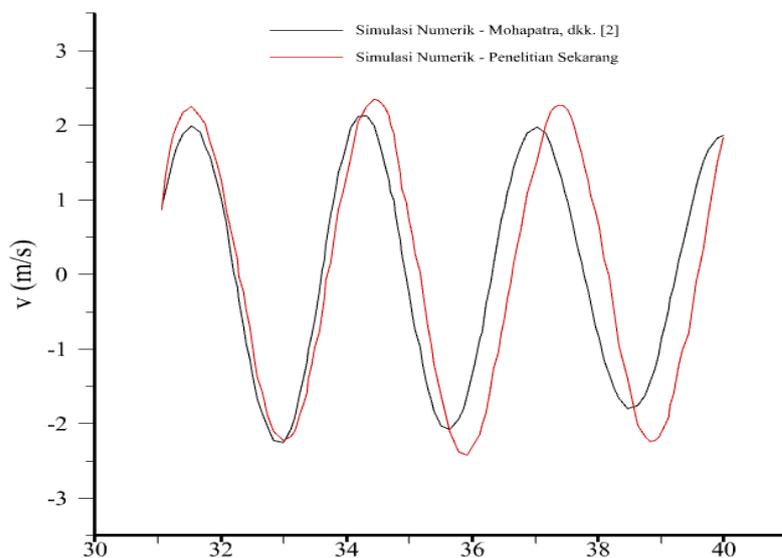
Untuk memilih *mesh* optimal yang menghasilkan solusi independen terhadap *grid*, sebuah studi independensi dilakukan. Empat jenis *grid* dengan ukuran elemen disekitar kolom 0.05; 0.025; 0.0125; dan 0.00625 meter diuji untuk mempelajari independensi *grid*. Jumlah elemen dan *nodes* tiap *grid* ditampilkan pada Tabel 2 dan plot kecepatan udara maksimal pada saluran diatas kolom (v_{udara_maks}) terhadap variasi *grid* ditampilkan pada Gambar 2. Nilai v_{udara_maks} mulai stabil atau mencapai independensi ketika ukuran *mesh* bernilai 0.0125 meter ke bawah sehingga *mesh* dengan ukuran 0.0125 meter dipilih untuk simulasi numerik lebih lanjut.



Gambar 2. Grafik Studi Independensi Grid

3.2 Validasi Numerik

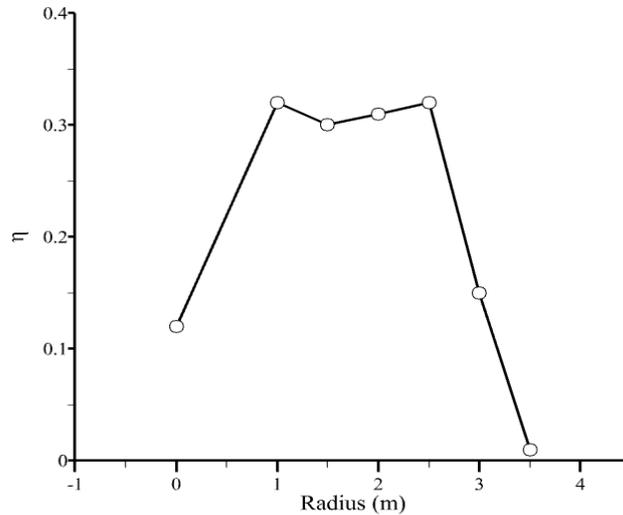
Untuk memastikan validitas dari simulasi numerik yang dilakukan, hasil simulasi yang didapatkan divalidasi dengan hasil simulasi numerik dari penelitian Mohapatra, dkk. [2]. Nilai numerik dari kecepatan udara pada saluran diatas kolom, v , terhadap rentang waktu aliran 31 sampai 40 sekon pada frekuensi tak berdimensi, Kh , bernilai 1.91 dan lebar radius *convex* sebesar 2 meter diplot sesuai pada Gambar 3. Hasil simulasi numerik pada penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian oleh Mohapatra, dkk. [2] dengan nilai error relatif sebesar 17%.



Gambar 3. Grafik Nilai Kecepatan Udara pada Saluran Diatas Kolom

3.3 Pengaruh Variasi Lebar Radius Bentuk Convex

Performa hidrodinamis OWC dengan profil dasar datar (nilai radius sama dengan nol) [2] dan berprofil dasar *convex* dengan nilai radius 1; 1.5; 2; 2.5; 3; dan 3.5 meter ditampilkan pada Gambar 4. Pada Gambar 4 dapat dilihat bahwa ketika lebar radius *convex* bernilai 1 sampai 2.5 meter, nilai performa hidrodinamis cenderung stagnan berada pada kisaran nilai 0.3 – 0.32. Namun ketika lebar radius *convex* bernilai lebih dari 2.5 meter, performa hidrodinamis mengalami penurunan yang signifikan, bahkan lebih rendah daripada OWC dengan profil dasar datar ketika lebar radius bernilai 3.5 meter.



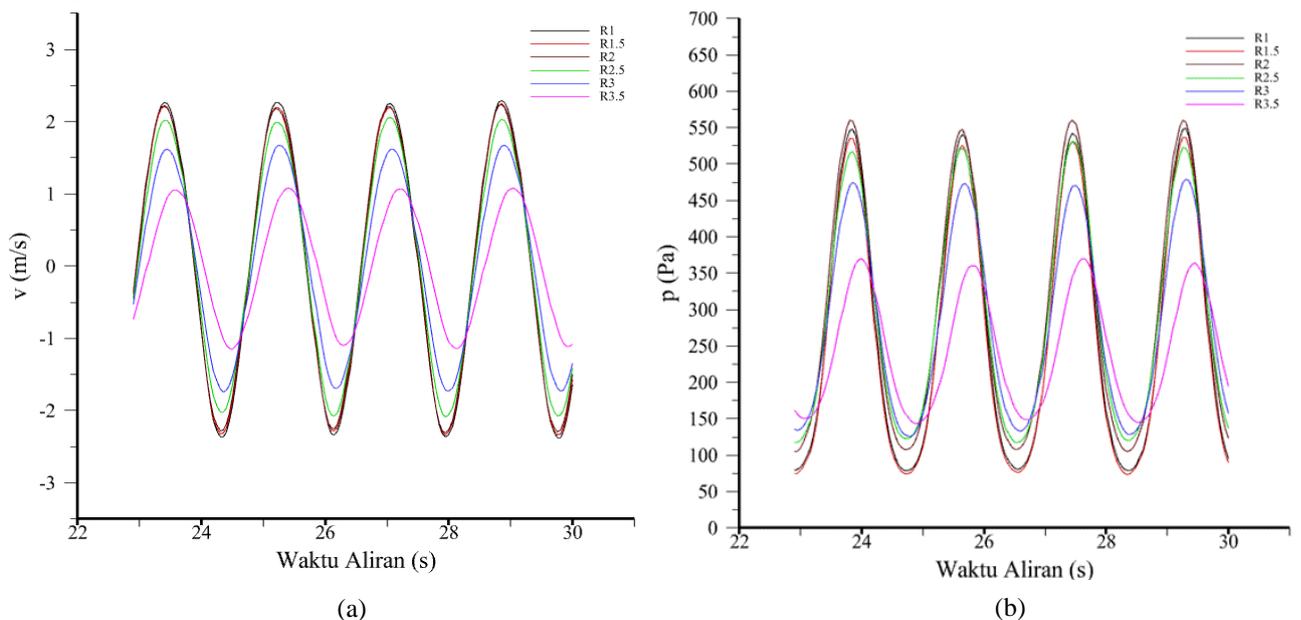
Gambar 4. Grafik Performa Hidrodinamis OWC terhadap Radius Convex

Penurunan nilai performa hidrodinamis ini dapat disebabkan oleh penurunan nilai kecepatan udara pada saluran di atas kolom, v , dan tekanan pada kolom, p . Dapat dilihat pada Gambar 5(a) dan 5(b) bahwa nilai v dan p menurun sebagai akibat dari perluasan lebar radius *convex*, terutama ketika lebar radius *convex* bernilai lebih dari 2.5 meter. Nilai v kemudian berbanding lurus dengan volume udara yang melewati sisi terbuka pada bagian atas kolom, q , sehingga ketika nilai v dan p menurun, maka nilai P_{out} juga akan menurun sesuai dengan Persamaan 4 berikut:

$$P_{out} = \frac{1}{T} \int_0^T p_c(t)q(t)dt \tag{4}$$

Dengan nilai P_{out} yang menurun dan nilai P_{in} tetap, maka performa hidrodinamis juga akan menurun, sesuai dengan Persamaan 6 berikut:

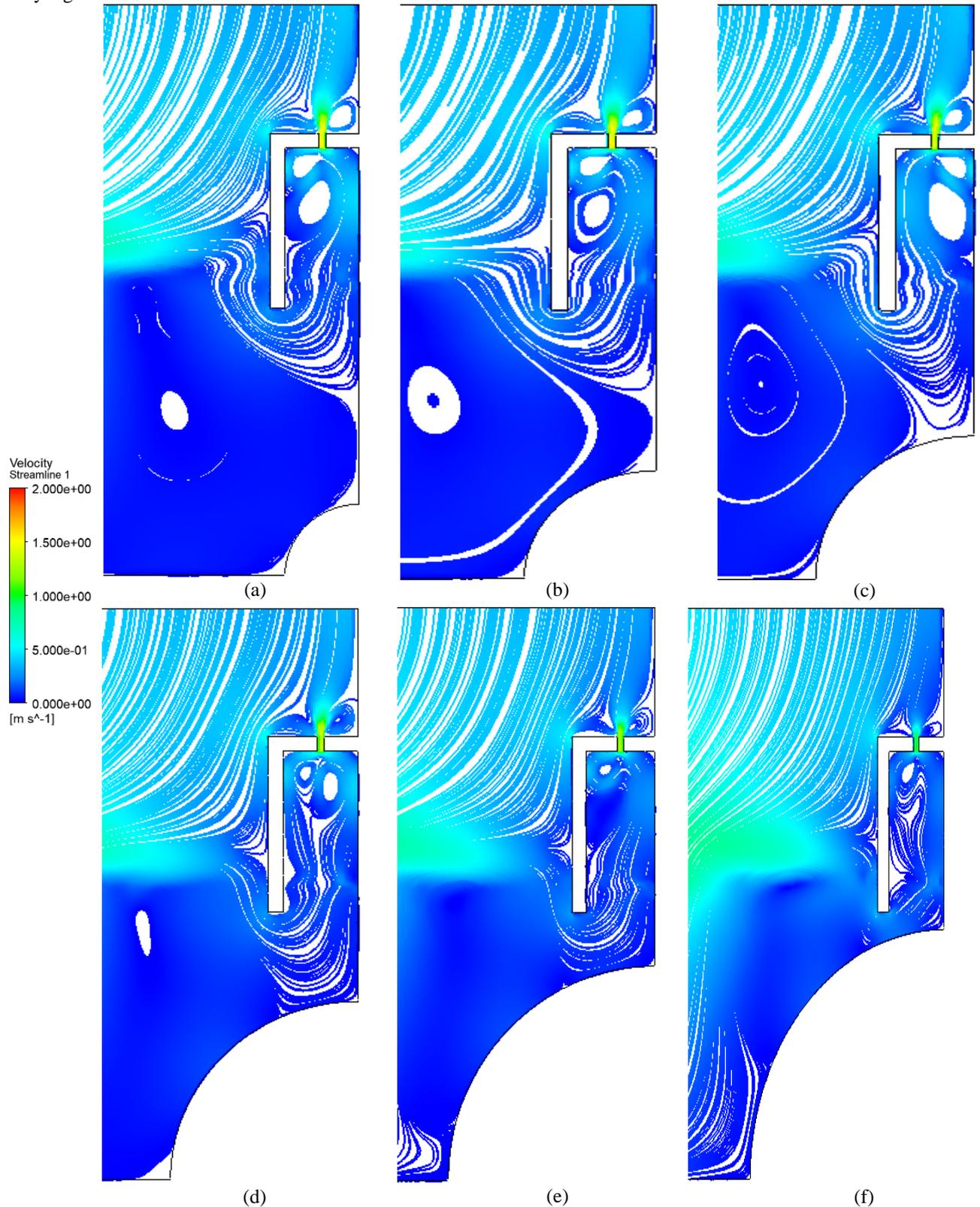
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{6}$$



Gambar 5. Grafik Nilai (a) Kecepatan, v ; (b) Tekanan, p ; terhadap Rentang Waktu Aliran

Secara lebih lanjut, penurunan nilai v dan p yang signifikan kemungkinan disebabkan oleh terhambatnya aliran air sebagai akibat penggunaan *convex* dengan lebar radius yang terlalu besar. Hal ini karena ketika *convex* memiliki lebar

radius yang terlalu besar atau dapat dikatakan tidak optimal, terdapat lebih sedikit air yang masuk kedalam kolom dan memompa udara keluar dan masuk sehingga mempengaruhi nilai v dan p . Dapat dilihat pada Gambar 6(a) hingga 6(d) bahwa air disekitar *convex* dengan lebar radius 1 hingga 2.5 meter mengalir lebih banyak kedalam kolom, dibandingkan *convex* dengan lebar radius 3 meter dan 3.5 meter. Penggunaan *convex* dengan radius yang terlalu besar, seperti pada Gambar 6(e) dan 6(f), menyebabkan sebagian air menjadi berkumpul dan berputar didepan *convex* sehingga lebih sedikit air yang masuk kedalam kolom.



Gambar 6. Streamlines pada Waktu Aliran 40 s, (a) R = 1 meter, (b) R = 1.5 meter, (c) R = 2 meter, (d) R = 2.5 meter, (e) R = 3 meter, (f) R = 3.5 meter

Ketika lebar radius *convex* bernilai 1 sampai 2.5 meter, aliran air yang memasuki kolom secara optimal dapat meningkatkan v dan p , yang mana meningkatkan performa hidrodinamis, jika dibandingkan dengan profil dasar berbentuk datar, sesuai dengan penelitian oleh Mohapatra, dkk. [2]. Namun ketika lebar radius *convex* yang digunakan melebihi 2.5 meter, menyebabkan penurunan nilai v , p , dan juga performa hidrodinamis. Melalui penelitian ini, didapat hasil bahwa untuk mendapatkan performa hidrodinamis OWC dengan profil dasar berbentuk *convex* yang lebih baik dibandingkan profil berbentuk datar, lebar radius *convex* yang disarankan adalah tidak lebih besar daripada 75% nilai kedalaman air.

4. Kesimpulan

Penggunaan profil dasar berbentuk *convex* pada OWC dapat meningkatkan performa hidrodinamis dari OWC jika dibandingkan dengan penggunaan profil dasar berbentuk datar. Melalui hasil pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan performa hidrodinamis OWC dengan profil dasar berbentuk *convex* yang optimal, lebar radius yang disarankan adalah tidak lebih besar daripada 75% nilai kedalaman air.

Daftar Pustaka

- [1] A. F. O. Falcão and J. C. C. Henriques, "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1391–1424, 2016.
- [2] P. Mohapatra, K. G. Vijay, A. Bhattacharyya, and T. Sahoo, "Influence of distinct bottom geometries on the hydrodynamic performance of an OWC device," *Energy*, vol. 277, no. March, p. 127605, 2023.
- [3] A. Uihlein and D. Magagna, "Wave and tidal current energy - A review of the current state of research beyond technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1070–1081, 2016.
- [4] P. Oliveira, F. Taveira-Pinto, T. Morais, and P. Rosa-Santos, "Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator," *Energy Convers. Manag.*, vol. 110, pp. 165–175, 2016.
- [5] C. Xu, Z. Liu, and G. Tang, "Experimental study of the hydrodynamic performance of a U-oscillating water column wave energy converter," *Ocean Eng.*, vol. 265, no. August, p. 112598, 2022.
- [6] M. A. Mustapa, O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, C. K. Rheem, K. K. Koh, and F. A. Adnan, "Wave energy device and breakwater integration: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. March, pp. 43–58, 2017.
- [7] B. Jayant Baliga, "Chapter 15 - IGBT Applications: Renewable Energy," in *The IGBT Device (Second Edition)*, 2nd ed., T. I. D. (Second E. Baliga, B. Jayant and Elsevier, Eds. 2023, pp. 535–586.
- [8] D. Ning, Y. Zhou, and C. Zhang, "Hydrodynamic modeling of a novel dual-chamber OWC wave energy converter," *Appl. Ocean Res.*, vol. 78, no. March, pp. 180–191, 2018.
- [9] I. Simonetti, L. Cappietti, and H. Oumeraci, "An empirical model as a supporting tool to optimize the main design parameters of a stationary oscillating water column wave energy converter," *Appl. Energy*, vol. 231, no. September, pp. 1205–1215, 2018.
- [10] C. Xu, Z. Huang, and Z. Deng, "Experimental and theoretical study of a cylindrical oscillating water column device with a quadratic power take-off model," *Appl. Ocean Res.*, vol. 57, pp. 19–29, 2016.
- [11] I. López, R. Carballo, D. M. Fouz, and G. Iglesias, "Design selection and geometry in owc wave energy converters for performance," *Energies*, vol. 14, no. 6, pp. 1–18, 2021.
- [12] G. Zhu, J. Samuel, S. Zheng, J. Hughes, D. Simmonds, and D. Greaves, "Numerical investigation on the hydrodynamic performance of a 2D U-shaped Oscillating Water Column wave energy converter," *Energy*, vol. 274, no. March, p. 127357, 2023.