

Analisis Pengaruh Aliran Hidrodinamis Pada Oscillating Water Column Wave Energy Converter

Emma Patricia Bangun¹, Annisa Lawahizh Damanik²

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan ^{1,2}

E-mail: emma.patricia@usu.ac.id

Abstrak

Energi gelombang laut merupakan suatu energi laut terbarukan yang memiliki potensi tinggi untuk kawasan yang memiliki garis pantai yang panjang dan perairan luas. Oscillating Water Column (OWC) merupakan suatu perangkat yang dapat bekerja menangkap dan mengkonversi energi gelombang menjadi energi listrik. Penelitian ini bertujuan menginvestigasi pengaruh aliran hidrodinamis pada respons kolom air di dalam bottom-standing OWC dengan bentuk penampang L sebagai akibat interaksinya dengan gelombang laut. Aliran hidrodinamis dapat dipengaruhi oleh bentuk mulut dari OWC serta viskositas air yang dapat meningkatkan gesekan dan redaman pada aliran. Melalui pemodelan numerik tentang interaksi antar gelombang laut pada berbagai periode dan OWC dengan variasi bentuk mulutnya, muka air di dalam dan luar OWC, kecepatan aliran dan pembentukan vortex dapat dianalisa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa OWC dengan mulut lonceng menghasilkan vortex lebih sedikit dan karenanya amplitudo respons yang lebih besar. Sementara itu, viskositas tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons kolom air. Penelitian ini juga menganalisa pengaruh kedalaman air dalam menentukan periode alamiah kolom air. Hal ini penting dalam mencapai kinerja maksimal OWC dengan mengkondisikan keadaan resonansi pada kolom air.

Kata kunci: aliran viskos, bentuk mulut, OWC, OpenFOAM, vortex.

Abstract

Ocean wave energy is a marine renewable energy that has potential for areas with long shorelines and wide coasts. Oscillating Water Column (OWC) is a device that captures and converts wave energy into electrical energy. This study aims to investigate the influence of hydrodynamic flows on the response of water columns within a bottom-standing OWC that has an L-shaped area. The flows may be influenced by the mouth shape of the OWC and the water viscosity that may increase friction and damping on the flows. Through the numerical models of the interactions between the waves at various periods and the OWC with different mouth shapes, the water elevations that arise within and outside the OWC, flow velocity and vortex generation were analysed. The present findings show that the OWC with a bell mouth generates minimal vortices and hence larger amplitude of response. In contrast, the viscosity has little significance on the response. In addition to the damping mechanisms, this study analyses the influence of water depth on determining the natural period of the water column. This is important in achieving maximal performance of the OWC by tuning a resonant condition on the water column.

Keywords: viscous flow, mouth shape, OWC, OpenFOAM, vortex

1. PENDAHULUAN

Sumber energi yang semakin menipis menjadi awal mula berbagai penelitian untuk menemukan sumber energi terbarukan. Salah satu energi terbarukan yang berhasil ditemukan adalah energi terbarukan kelautan. Energi terbarukan kelautan merupakan teknologi yang diinstalasi dan dioperasikan baik di tengah laut maupun di tepi pantai. Energi ini mencakup energi yang dihasilkan oleh angin lepas pantai, pasang surut air laut, maupun energi gelombang. Salah satu sumber energi yang dianggap menjanjikan dari energi terbarukan kelautan adalah energi gelombang. Energi gelombang dianggap dapat memberikan kontribusi yang menjanjikan terutama dalam hal memasok energi listrik yang merupakan kebutuhan penting bagi keberlangsungan hidup manusia (Falcão et al., 2016; He et al., 2016).

Penemuan bahwasanya energi gelombang dapat dikonversikan menjadi energi listrik bukanlah sebuah penemuan yang terbilang baru sehingga telah terdapat ratusan penelitian terhadap konverter energi gelombang yang didaftarkan di seluruh dunia. Dari ratusan penelitian tersebut, teknologi *Oscillating Water Column* (OWC) *Wave Energy Converter* (WEC) muncul sebagai salah satu yang paling berhasil, karena telah sampai pada tahap skema rancangan skala penuh seperti Pico Plant di Portugal (Falcão, 2000), Limpet di Scotland dan OWC Plant (Heath, 2011) di Norway (Falcão et al., 2010). OWC WEC menghasilkan energi listrik dari naik turunnya air laut akibat gelombang laut yang masuk ke dalam sebuah kolom osilasi yang berlubang. Naik turunnya air laut ini akan mengakibatkan keluar masuknya udara di lubang bagian atas kolom dan tekanan yang dihasilkan dalam kolom tersebut akan menggerakkan turbin.

Studi mengenai efisiensi kinerja OWC WEC dalam mengkonversi sendiri telah banyak dilakukan baik secara teoritis (Evans dan Porter, 1995), eksperimen fisik dan numerik (Ning, 2020, Zhou et al., 2021a, 2021b). Konsep teoritis mengasumsikan gelombang linear dan fluida ideal menyebabkan adanya penyimpangan besar dalam prediksi respons kolom air di dalam OWC WEC. Amplitudo responsnya diasumsikan memiliki hubungan linear dengan amplitudo gelombang datang. Namun, penelitian terdahulu menunjukkan adanya ketergantungan tidak linear dari rasio antara amplitudo kolom air (atau elevasi muka air di dalam OWC) terhadap amplitudo gelombang datang (Elhanafi and Kim, 2018; Zhou et al., 2020, 2021b, Bangun, 2024a).

Wang et al. (2018) menyatakan bahwa penyebab ketergantungan tersebut adalah pengaruh tidak linear antara gelombang datang dengan OWC. Namun, Bangun (2024a) menginvestigasi OWC yang berbentuk penampang silinder serta ramping dan menyatakan bahwa pengaruh aliran hidrodinamis memegang peranan utama dalam perilaku tersebut. Terdapat dua mekanisme redaman yang dapat berkontribusi terhadap redaman pada amplitudo kolom air, yaitu gesekan antara dinding dan air serta gerakan rotasi air seperti *vortex*. Kedua mekanisme tersebut bersifat tidak linear sejalan dengan hubungan energi hilang dengan kecepatan aliran dalam persamaan Darcy-Weisbach (Gerhart et al., 2016). Pengaruh terbesar dari dua mekanisme tersebut belum dianalisa lebih lanjut. Pemahaman mengenai hal ini bermanfaat untuk dapat mengetahui modifikasi pada OWC yang dapat dilakukan untuk mengurangi redaman sehingga meningkatkan kinerjanya. Selain itu, pengaruh gesekan akibat viskositas dan efeknya terhadap penskalaan model OWC dapat pula diestimasi.

Modifikasi geometri ruang yang dilakukan oleh Boccotti (2007) menemukan bahwa terdapat peningkatan performa pada *bottom-standing* OWC yang memiliki penampang berbentuk

U dibandingkan dengan OWC tipe konvensional (berbentuk L). Vyzikas et al. (2017) dan Samak et al. (2021) melakukan studi lanjutan dengan membandingkan beberapa geometri OWC untuk menemukan bentuk geometri paling potensial dalam menghasilkan efisiensi hidrodinamis. Dari penjelasan sebelumnya ini, dapat dikatakan bahwa faktor seperti geometri ruang mempengaruhi kinerja OWC. Hal ini menginisiasi perlunya menginvestigasi aliran hidrodinamisnya yang bergantung pada bentuk geometri OWC dan dapat mempengaruhi mekanisme redaman. *Bottom-standing* OWC dengan penampang berbentuk L secara khusus diinvestigasi pada studi ini oleh karena kemudahannya dalam melakukan pemeliharaan di wilayah dekat perairan. Selain itu, tipe L dibandingkan tipe U memiliki kinerja yang lebih baik untuk daerah perairan dengan periode gelombang dominannya yang relatif kecil (di bawah 10 s) seperti pada perairan di Indonesia bagian barat (Bangun dan Murniza, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh utama peredaman gerakan elevasi muka air di dalam *bottom-standing* OWC dengan penampang berbentuk L serta mengetahui mekanisme redaman yang paling signifikan. Terdapat dua jenis bentuk mulut OWC yang akan diinvestigasi untuk memahami mekanisme redaman utamanya dan mulut yang lebih efektif dalam menangkap energi gelombang. Visualisasi aliran air di sekitar mulut akan ditampilkan untuk mengkonfirmasi hasil analisa. Pengaruh kedalaman air dan panjang kolom air terhadap periode alamiahnya juga diinvestigasi dengan mempertimbangkan beberapa variasi periode gelombang.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Metode komputasi dan persamaan pengatur

Analisis kinerja *bottom-standing* OWC dapat dilakukan dengan menggunakan dua solusi berbasis *linear potential flow theory* yang dikembangkan dari persamaan Laplace dan *viscous flow* yang diturunkan dari persamaan Navier Stokes. *Linear potential flow theory* mengasumsikan bahwa fluida bersifat ideal yaitu tidak viskos, tidak berotasi dan tidak dapat dimampatkan. Keunggulan dari pemecah (*solver*) berbasis teori ini adalah proses komputasi yang lebih cepat dan penggunaan perangkat komputasi standar. Hal ini dikarenakan viskositas serta perubahan kecepatan yang terjadi di dalam lapisan batas (*boundary layer*) dapat diabaikan. Sebaliknya, *viscous solver* mempertimbangkan adanya viskositas dan gerak rotasi air. Oleh karenanya, untuk aliran fluida yang melibatkan gerak rotasi dan pentingnya viskositas, *viscous solver* dapat menghasilkan analisis yang lebih akurat. Hanya saja waktu komputasi yang dibutuhkan lebih lama terlebih apabila perlu melakukan pemodelan tiga dimensi.

Persamaan Navier-Stokes yang diterapkan dalam *viscous solver* merupakan suatu persamaan turunan parsial yang mengatur perubahan momentum dan massa suatu fluida dengan memperhitungkan pengaruh tegangan geser serta gerak rotasi air pada tekanan fluida. Percepatan fluida dilihat sebagai penjumlahan percepatan lokal (perubahan terhadap waktu) dan percepatan konvektif yang merupakan persamaan tidak linear. Persamaan Navier-Stokes untuk fluida yang tidak mampu mampat dapat dinyatakan ke dalam persamaan (1) dan (2) berikut:

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + \frac{1}{\rho} g, \quad (2)$$

di mana u adalah vektor kecepatan fluida, t waktu, p tekanan, ρ massa jenis fluida, ν viskositas kinematik dan g adalah gravitasi yang hanya berlaku dalam arah gravitasi.

Penyelesaian persamaan di atas tidak bisa diperoleh secara analitis. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan numerik yang juga disebut dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Perhitungan ini umumnya menerapkan metode volume hingga dengan membagi-bagi domain komputasi menjadi sejumlah sel dengan volumenya di dalam suatu jaring (*mesh*).

Pemodelan kinerja OWC dalam hal ini respons (atau gerak osilasi) kolom air merupakan permasalahan multifase (*multiphase problem*) karena melibatkan fase udara dan gas. Untuk memprediksi naik turun permukaan bebas pada kolom air serta penjalaran gelombang, *interface capturing method* berbasis *volume of fluid* (VOF) diterapkan (Hirt & Nichols, 1981). Metode ini dianggap paling diandalkan karena dapat memodelkan gerakan permukaan bebas yang ekstrim sehingga tidak ada batasan sehubungan dengan amplitudo gelombang. Permukaan bebas diprediksi melalui metode VOF tersebut dengan menggunakan suatu indikator fase, α , yang bernilai $0 < \alpha < 1$. Sel yang diisi sepenuhnya dengan fase gas memiliki nilai α sebesar 0 sedangkan untuk fase air bernilai 1. Transportasi variabel α diselesaikan mengikuti persamaan (3) berikut:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \alpha \nabla \cdot u + \nabla \cdot u_r \alpha (1 - \alpha) = 0, \quad (3)$$

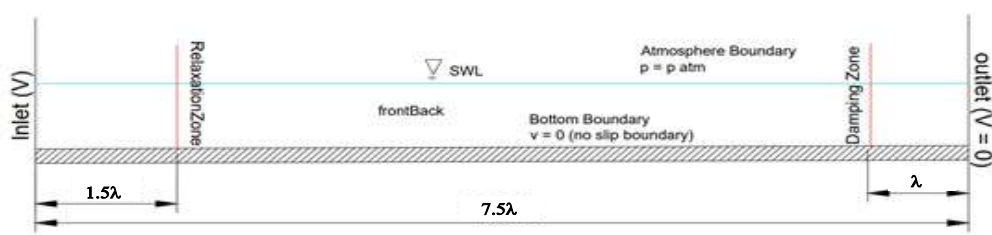
dengan u_r adalah *compression velocity* untuk memprediksi permukaan air dengan resolusi tinggi.

OpenFOAM sebagai suatu perangkat lunak berbasis CFD yang menerapkan metode volume hingga serta metode VOF untuk memodelkan permasalahan multifase. Terdapat beberapa *library* dan *solver* yang ditulis dalam bahasa pemrograman C++ dan dapat dijalankan bergantung pada jenis permasalahan yang diselesaikan. Untuk pemodelan yang melibatkan multifase, *interFoam solver* diterapkan. Prosedurnya dimulai dengan memprediksi kecepatan berdasarkan persamaan konservasi momentum. Prediksi kecepatan tersebut dikoreksi agar memenuhi persamaan konservasi massa sekaligus menganalisa tekanan. Algoritma PIMPLE yang merupakan kombinasi algoritma PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) (Issa, 1986) dan SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation*) (Ferziger & Peric, 2001) digunakan. Demikian prosedur tersebut diulang hingga mencapai kriteria konvergensi. Penelitian ini menggunakan OpenFOAM versi 3.0 serta fasilitas komputer dengan spesifikasi Intel Core-i5 dari Laboratorium Komputasi, Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara.

2.2 Domain komputasi dan kondisi batas

Domain komputasi merupakan suatu area di mana aliran fluida akan disimulasikan sehingga lapangan kecepatan, tekanan dan indikator fase pada domain tersebut dapat diketahui. Setiap domain dilingkupi oleh permukaan, dan kondisi batas merupakan aturan atau ketentuan yang berlaku dan harus dipatuhi agar perilaku aliran fluida menyerupai yang sebenarnya. Penelitian ini akan memodelkan respons akibat gelombang datang pada kolom air yang berada di dalam *bottom-standing* OWC. Oleh karenanya, domain komputasinya menyerupai tanki gelombang atau dinamakan *Numerical Wave Tank* (NWT). Bersama dengan penggunaan *waves2Foam toolbox* yang tersedia pada OpenFOAM, NWT dapat mensimulasikan interaksi antara gelombang air laut dengan dan tanpa struktur yang ada di dalamnya. Hasil pemodelan memberikan data yang akurat dengan biaya yang lebih rendah bila dibandingkan dengan uji fisik.

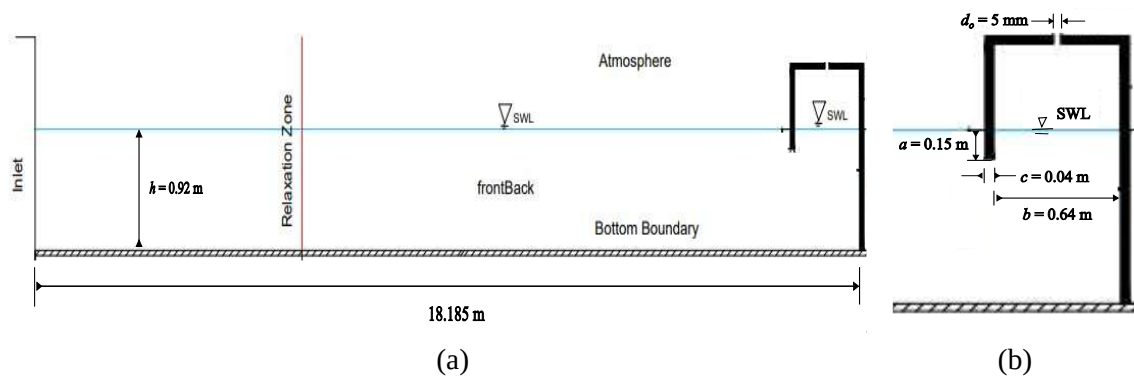
Gambar 1 menunjukkan pemodelan NWT dengan beberapa kondisi batas yaitu *Inlet* dan *Outlet* pada batas kiri dan kanan, *Bottom Boundary* dan *Atmosphere Boundary* pada batas dasar dan atas, serta *frontBack* yang diterapkan untuk pemodelan dua dimensi pada bagian muka dan belakang NWT. Besar kecepatan dan elevasi muka air pada *Inlet* ditetapkan dari waktu ke waktu sesuai dengan teori gelombang yang dipilih dan tersedia pada *waves2Foam toolbox*. Berbeda dengan *Inlet* yang di mana besar kecepataannya bervariasi terhadap waktu, kecepatan selalu diatur sebesar nol pada *Bottom Boundary* karena sifat dasar NWT yang tidak tembus air serta berlakunya kondisi aliran yang tidak tergelincir (*no slip*).



Gambar 1. Pemodelan *Numerical Wave Tank* dengan kondisi batas yang diterapkan

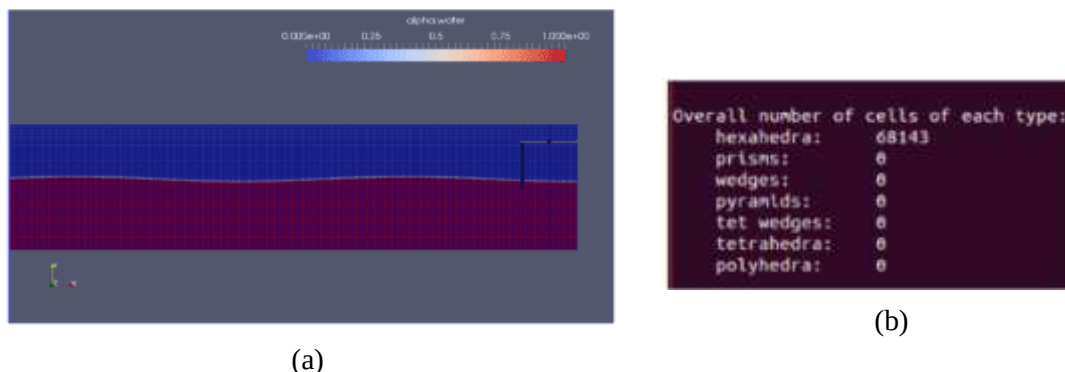
Pada *Atmosphere Boundary*, tekanan ditetapkan sebesar tekanan atmosfer sedangkan kecepatan aliran yang melalui batas dihitung selama simulasi berjalan. Gelombang disimulasikan menjalar dari *Inlet* menuju *Outlet*. Untuk mengurangi efek refleksi gelombang akibat pantulan pada *Inlet*, panjang *Relaxation Zone* ditetapkan sebesar 1.5λ di mana λ merupakan panjang gelombang. Untuk meredam energi gelombang sehingga muka air menjadi diam pada batas *Outlet*, *Damping Zone* didefinisikan sebesar λ (Jacobsen et al., 2012; Bangun, 2024a).

Data domain dari pemodelan sebuah NWT menggunakan parameter gelombang yang didefinisikan oleh Morris-Thomas et al. (2007) dengan panjang NWT sebesar 30.375 m, tinggi 1.62 m dan lebar sebesar 0.1 m. Kedalaman air, h , ditetapkan bernilai 0.92 m, periode gelombang, T , sebesar 1.7 s sehingga panjang gelombang, λ , menurut persamaan dispersi gelombang adalah 4.05 m. Dengan amplitude gelombang, A , sebesar 0.031 m, kecuraman gelombang, A_k , adalah sebesar 0.0481. Berdasarkan grafik Le Mehaute (1976), teori gelombang yang sesuai dengan parameter gelombang tersebut adalah *Stokes 2nd order wave theory*. Komputasi domain yang dibatasi oleh keempat kondisi batas sebelumnya, dibagi-bagi menjadi sejumlah volume kontrol (*control volume*) atau CV dengan ukurannya di sekitar permukaan bebas mengikuti Bangun & Murniza (2024) yaitu $\Delta x = \lambda/240$ dan $\Delta z = A/4$, di mana Δx dan Δz masing-masing adalah ukuran CV dalam arah horisontal dan vertikal. Selanjutnya, pemodelan perangkat *bottom-standing OWC* di dalam NWT dilakukan dengan draft dinding muka depan, a , sebesar 0.15 m, lebar kolom air, b , dan ketebalan dindingnya, tw , masing-masing bernilai 0.64 m dan 0.04 m. Adapun mekanisme *power-take-off* disimulasikan sebagai aliran yang melalui lubang kecil (*orifice*) (Elhanafi et al., 2017; Zhou et al., 2020, 2021a, 2021b), dengan diameternya sebesar $d_o = 5$ mm. **Gambar 2(a)** menunjukkan perangkat *bottom-standing OWC* yang diletakkan di dalam NWT dan **Gambar 2(b)** menunjukkan tampilan dekat dari OWC tersebut. Kondisi batas pada pemodelan NWT sebelumnya juga berlaku, dengan kondisi batas tambahan yaitu dinding pada struktur OWC. Batas ini dimodelkan seperti pada batas *Bottom Boundary*, yang bermakna bahwa tidak ada kecepatan normal fluida dan berlakunya *no slip condition*.



Gambar 2. (a) Skematik penempatan *bottom-standing* OWC dalam NWT, (b) tampilan dekat yang menunjukkan tampak melintang dari OWC beserta dimensinya

Bentuk grid yang menggunakan *structured mesh* pada pemodelan *bottom-standing* OWC di dalam sebuah NWT ditampilkan pada **Gambar 3(a)**. Terlihat juga pemodelan gelombang datang melalui bentuk kurva permukaan bebas yang merupakan area di mana nilai α (atau α_{water}) berada di antara 0 (biru) dan 1 (merah). Dengan menggunakan perintah *checkMesh* sebagai salah satu *utility* dari OpenFOAM, jumlah dari *hexahedral cell* pada domain diketahui sebanyak 68,143 buah (lihat **Gambar 3(b)**). Data parameter gelombang berupa periode, T , panjang, λ , amplitudo, A , kedalaman air relatif terhadap panjang gelombang, h/λ , serta kecuraman gelombang, Ak , dapat dilihat pada **Tabel 1**. Terdapat empat kasus periode gelombang yang dimodelkan dengan kedalaman air, h , yang bernilai 0.92 m. Kedalaman relatif, h/λ , oleh karenanya berkisar 0.158-0.405. Rentang ini dipilih agar gelombang berada dalam kondisi perairan yang intermediate ($h/\lambda \leq 0.5$). Hal ini sesuai untuk konstruksi *bottom-standing* OWC yang tidak ekonomis pada laut dalam. Lebih lanjut, pemilihan kecuraman Ak ditentukan agar gelombangnya mendekati linear sehingga efek ketidaklinearan yang muncul dari mekanisme redaman aliran air pada kolom air dapat secara khusus diinvestigasi.



Gambar 3(a) Pemodelan *bottom-standing* OWC di dalam NWT menggunakan *structured mesh* dan (b) informasi jumlah sel yang digunakan di dalam pemodelan

Tabel 1. Parameter gelombang

T [s]	λ [m]	h/λ	A_k
1.268	2.27	0.405	0.086
1.574	3.58	0.257	0.054
1.700	4.05	0.227	0.048
2.211	5.82	0.158	0.033

2.3 Lokasi pengambilan data sampling

Studi ini menganalisa elevasi muka air di dalam dan di luar OWC. Elevasi muka air di dalam mengindikasikan respons kolom air terhadap gelombang dan berkaitan dengan besar energi yang dapat diekstrak melalui proses *power-take-off damping*. Elevasi muka air di luar merepresentasikan refleksi gelombang akibat dinding struktur OWC. Dalam hal ini, dua *wave gauges* (WGs) yang berfungsi untuk melakukan *data sampling* ditampilkan pada **Gambar 4**. Lokasi dari WG 1 terletak di titik tengah kolom air sedangkan WG 2 ditempatkan dekat di depan dinding struktur OWC. Pengambilan sampel muka air untuk penelitian ini menggunakan hasil simulasi dengan *waves2Foam* dan *surfaceWaveField utility* untuk menghasilkan data elevasi muka air dari waktu ke waktu.



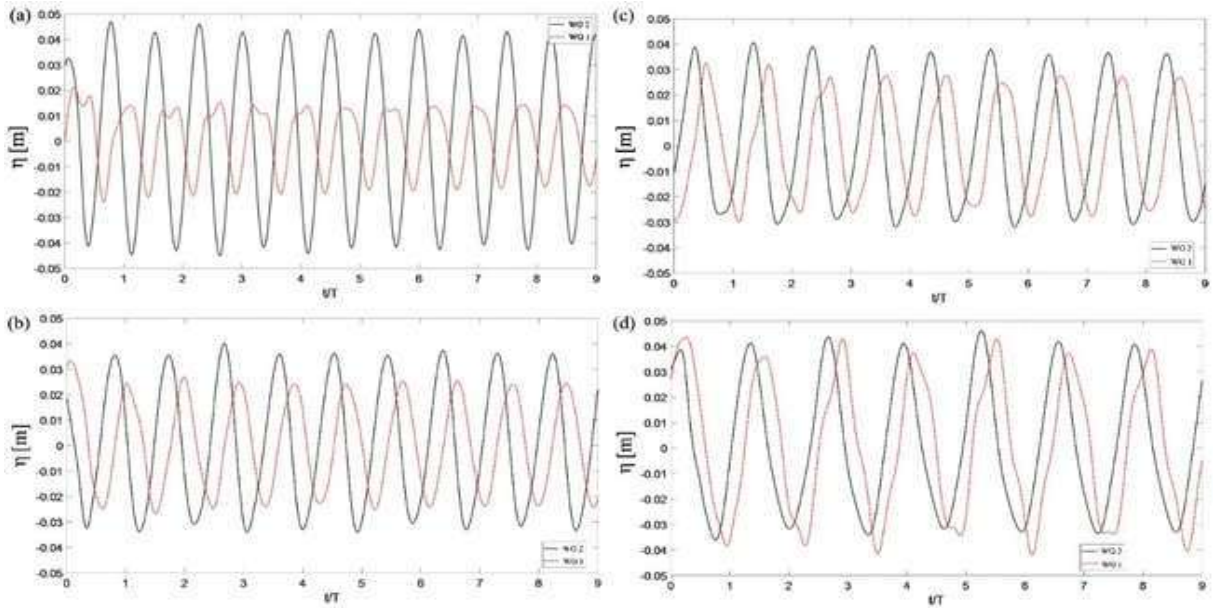
Gambar 4. Skema penempatan *wave gauges* (WGs) pada NWT

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

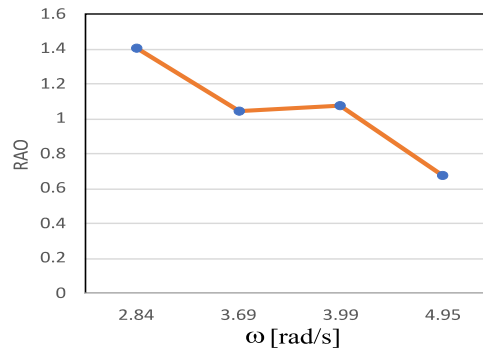
3.1 Efek periode gelombang

Pengaruh periode gelombang pada elevasi di dalam kolom air telah diinvestigasi sebelumnya untuk OWC berpenampang silinder (Zhou et al., 2020; Zhou et al., 2021b; Bangun, 2024a). Pengaruh periode gelombang, T , terhadap elevasi muka air, η , di dalam dan luar dari sebuah *bottom-standing* OWC dianalisa secara bersamaan. **Gambar 5** menampilkan variasi kedua elevasi tersebut untuk empat kasus gelombang pada **Tabel 1**. Semakin besar periode gelombang maka semakin besar pula amplitudo elevasi muka air di dalam OWC. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan amplitudo respons kolom air terhadap peningkatan periode, T , atau penurunan frekuensi sudut gelombang, ω . Pengamatan ini didukung oleh **Gambar 6** yang menunjukkan rasio antara amplitudo elevasi muka air internal terhadap amplitudo gelombang datang atau dinamakan Response Amplitude Operator (RAO). Nilai terbesarnya adalah 1.4, yaitu ketika T bernilai 2.211 s ($\omega=2.84$ rad/s). Adapun koefisien refleksi yang dihitung dari rasio amplitudo elevasi muka air di luar terhadap amplitudo gelombang datang bernilai antara 0.97-

1.33. Koefisien refleksi terbesar terjadi pada periode kecil. Sejalan dengan Wang et al. (2018), refleksi meningkat akibat intensitas interaksi gelombang datang dengan dinding depan struktur.



Gambar 5. Elevasi muka air, η , di dalam (WG 1-merah) dan di luar (WG 2-hitam) untuk periode gelombang, T : (a) 1.268 s, (b) 1.574 s, (c) 1.700 s dan (d) 2.211 s.



Gambar 6. Response Amplitude Operator (RAO) pada berbagai frekuensi sudut gelombang, ω

Peningkatan RAO pada periode gelombang terbesar disebabkan oleh kondisi kolom air yang mendekati atau mengalami resonansi. Resonansi pada kolom air dapat terlihat melalui perbedaan fase sebesar 90° antara elevasi muka air di dalam dengan di luar OWC (Bangun dan Murniza, 2024). **Gambar 5(d)** menunjukkan bahwa pada periode gelombang, T , sebesar 2.211 s, perbedaan fase mendekati nilai tersebut. Elevasi muka air di dalam OWC berada di posisi muka air rata-rata sedangkan elevasi muka air di luarnya berada di posisi puncak/lembah. Resonansi juga dapat diidentifikasi ketika periode alamiahnya kolom air mendekati periode gelombang datang. Periode alamiah, T_n , dan frekuensi alamiah, ω_n , dari suatu OWC ditentukan oleh panjang efektif kolom air, l'_{OWC} , sesuai persamaan (4) (Vyzikas et al., 2017):

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{l'_{OWC}}{g}} \quad \text{dan} \quad \omega_n = \frac{2\pi}{T_n} \quad (4)$$

Apabila hanya berdasarkan draft fisik kolom air, periode alamiah T_n adalah sebesar 0.777 s. Nilai ini jauh lebih rendah dari periode gelombang di mana kondisi resonansi terjadi ($T = 2.211$ s). Sebaliknya, bila perhitungannya berdasarkan kedalaman air yaitu 0.92 m, nilai T_n diprediksi sebesar 1.92 s, jauh lebih dekat ke 2.211 s sekalipun masih lebih kecil. Perbedaan sedikit ini disebabkan oleh adanya ‘draft’ tambahan akibat pembentukan *vortex* (pusaran air) yang dapat terjadi di dekat mulut OWC (Bangun, 2024b). Adapun besar pertambahannya dapat mencapai 30% dari draft aktualnya. Dengan demikian, untuk tipe *bottom-standing* OWC dengan bentuk penampang L, panjang efektif kolom air kolom air yang dilingkupi oleh OWC bukan ditentukan oleh draft mulut tetapi juga kedalaman airnya. Hal ini juga mungkin disebabkan karena adanya dinding belakang yang menahan sehingga ada massa tambahan akibat batas dinding tersebut.

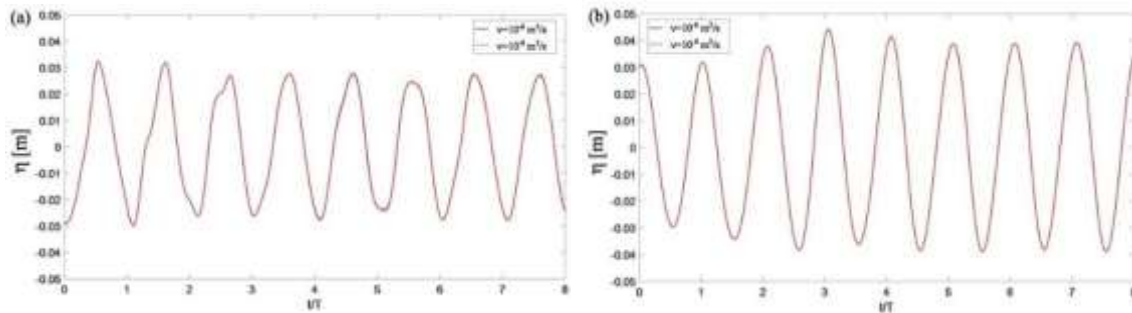
3.2 Efek viskositas air

Analisis berikutnya bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh viskositas air terhadap nilai RAO. **Tabel 2** menampilkan dua variasi nilai viskositas kinematik air, ν , yaitu sebesar 10^{-6} m²/s dan 10^{-8} m²/s untuk dua periode gelombang yaitu 1.7 s dan 2.211 s. Viskositas berpengaruh terhadap tegangan geser di dinding sehingga menghasilkan gesekan dengan aliran air dan dapat mengurangi gerakannya. Akibatnya viskositas mungkin dapat mempengaruhi nilai RAO dan besar energi yang dapat dikonversikan. Namun, **Gambar 7** membuktikan bahwa efek viskositas sangat kecil karena tidak terlihat perbedaan yang mencolok antara elevasi muka air di dalam.

Tabel 2. Rekapitulasi nilai RAO terhadap viskositas kinematik air, ν

T [s]	ω [rad/s]	ν [m ² /s]	A [m]	RAO
1.700	3.694	10^{-6}	0.031	1.045
		10^{-8}	0.031	1.045
2.211	2.840	10^{-6}	0.031	1.406
		10^{-8}	0.031	1.406

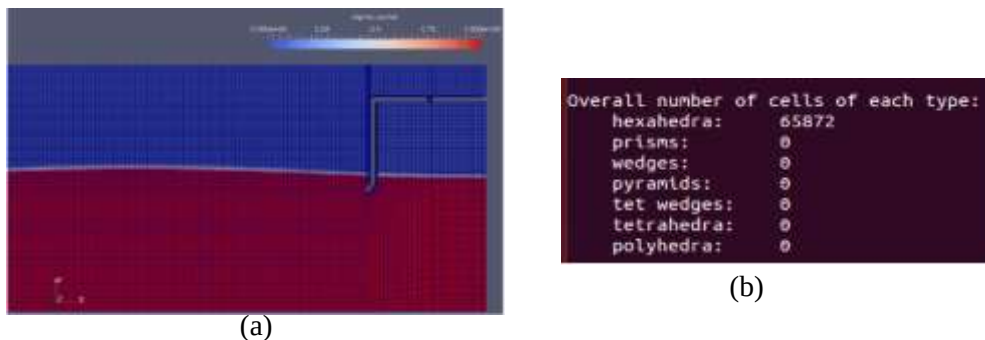
Tabel 2 juga menunjukkan nilai RAO yang tidak berbeda sekalipun nilai viskositas jauh berkurang. Efek viskositas ini juga mengindikasikan kecilnya pengaruh bilangan Reynolds terhadap RAO sebab perubahan viskositas juga berarti perubahan bilangan Reynolds, Re , yang didefinisikan sebagai UL/ν . Dalam hal ini, U adalah kecepatan aliran dan L karakteristik dimensi. Penurunan nilai ν berarti penambahan nilai Re . Dengan demikian, efek skala dimaknai kecil pada kasus OWC ini, yang artinya respons kolom airnya pada skala penuh (yang memiliki nilai Re besar) dapat dimodelkan dengan skala yang lebih kecil. Hal ini sejalan dengan yang studi sebelumnya untuk OWC pada instalasi di laut lepas (Elhanafi et al., 2017).



Gambar 7. Elevasi muka air, η , yang terjadi di dalam OWC pada kasus periode gelombang, T , bernilai (a) 1.700 s dan (b) 2.211 s.

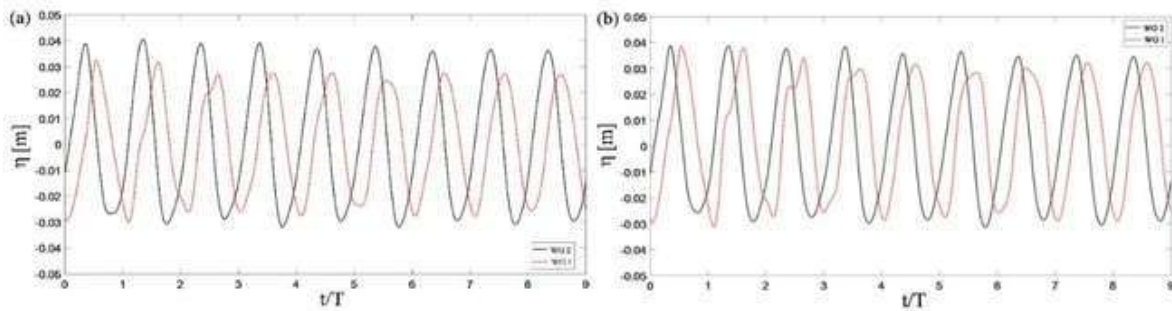
3.3 Efek bentuk mulut OWC

Analisis terakhir berkaitan dengan pengaruh bentuk mulut dari *bottom-standing* OWC terhadap respons kolom air. Terlihat pada **Gambar 8(a)** bahwa OWC tersebut dimodifikasi sehingga memiliki mulut berbentuk lonceng (*bell mouth*). Ukuran sel di dekat permukaan bebas tetap mengikuti ukuran pada pemodelan OWC sebelumnya yang memiliki mulut/ujung yang tajam (*sharp end*). Informasi yang ditampilkan melalui penggunaan perintah *checkMesh* pada **Gambar 8(b)** menunjukkan bahwa terdapat *hexahedral cell* sebanyak 65872.



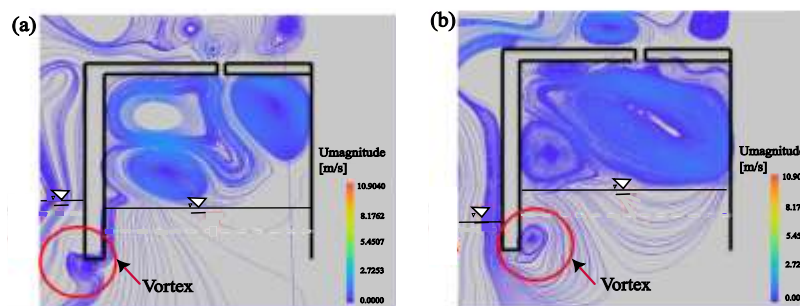
Gambar 8. (a) Pemodelan *bell-mouthed* OWC di dalam NWT menggunakan *structured mesh* dan **(b)** informasi jumlah sel yang digunakan di dalam pemodelan

Untuk memahami efek geometri dari mulut OWC, elevasi muka air dari tipe *sharp-ended* dan *bell-mouthed* OWC dibandingkan. **Gambar 9(a)** dan **(b)** masing-masing menunjukkan elevasi muka air, η , yang diprediksi di dalam (WG1) dan di luar (WG2) dari kedua tipe OWC tersebut pada periode gelombang sebesar 1.7s. Perbandingan kedua elevasi tersebut menunjukkan adanya peningkatan amplitude elevasi di dalam untuk tipe *bell-mouthed* OWC dengan nilai RAO-nya berkisar 1.252. Nilai ini lebih besar dibandingkan tipe *sharp-ended* OWC (RAO = 1.045).



Gambar 9. Elevasi muka air, η , diprediksi di dalam (WG1-merah) dan di luar (WG2-hitam) dari: (a) *sharp-ended* dan (b) *bell-mouthed* OWC untuk periode gelombang, T , sebesar 1.7 s

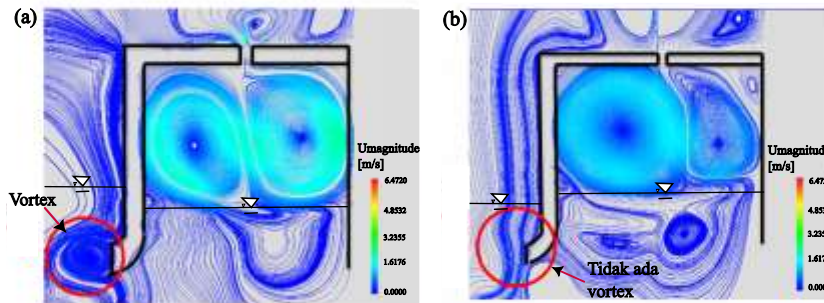
Peningkatan nilai RAO pada tipe *bell-mouthed* OWC dapat dijelaskan dengan membandingkan garis arus (*streamline*) serta lapangan kecepatan pada aliran fluida (air) di sekitar mulut OWC. **Gambar 10** menunjukkan garis arus dan kecepatan untuk tipe *sharp-ended* OWC. Terlihat bahwa terbentuk *vortex* yang berada di luar dekat dinding mulut pada waktu elevasi muka air mencapai posisi minimum. Demikian pula, pada waktu mencapai posisi maksimum, *vortex* terbentuk dan berada di sisi bagian dalam dinding OWC. *Vortex* terbentuk oleh karena aliran air mempertahankan kurvatur pergerakannya tanpa mengalami perubahan drastis sehingga ketika terjadi perubahan dinding yang drastis seperti pada *sharp end*, aliran air membentuk kurvatur yang melengkung seperti pusaran air. Kedua *vortex* tersebut terbentuk setiap satu periode gelombang dan apabila telah terbentuk sepenuhnya serta mengalami pelepasan, *vortex* akan mengalami konveksi dan disipasi yang menyebabkan berkurangnya energi kinetiknya.



Gambar 10. Garis arus dan lapangan kecepatan ketika muka air di dalam *sharp-ended* OWC berada di posisi: (a) minimum dan (b) maksimum

Gambar 11 menunjukkan bahwa pada tipe *bell-mouthed* OWC, *vortex* hanya terbentuk ketika muka air di dalam turun menuju posisi minimum. Sebaliknya, ketika menuju puncak elevasi, tidak terbentuk *vortex*. Perbedaan observasi tersebut menandakan bahwa pembentukan *vortex* lebih intens pada tipe sebelumnya yaitu *sharp-ended* OWC. Dalam kasus pembentukan *vortex* yang intens, terjadi peredaman gerakan dari elevasi muka air di dalam *sharp-ended* OWC yang lebih signifikan sehingga amplitudo elevasi tersebut atau nilai RAO-nya akan menjadi lebih kecil. Perbandingan hasil pada **Gambar 9** serta **Gambar 10** dan **11** menekankan bahwa gesekan pada dinding bukanlah kontributor peredaman utama gerakan elevasi muka air di dalam karena tipe *bell-mouthed* OWC justru memiliki penampang yang lebih luas dan karenanya gesekan pada

dinding yang lebih besar. Mekanisme redaman yang dominan berasal dari *vortex* yang intensitas pembentukannya dipengaruhi oleh bentuk mulut atau perubahan geometri pada mulut OWC.



Gambar 11. Garis arus dan lapangan kecepatan ketika muka air di dalam *bell-mouthed* OWC berada di posisi: (a) minimum dan (b) maksimum.

Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan nilai RAO sebesar 20% dengan menggunakan *bell mouth* pada OWC. Nilai ini jauh lebih besar bila dibandingkan dengan pengaruh memodifikasi ketebalan dinding dan kurvatur dari ujung dinding muka OWC. Morris-Thomas et al. (2006) menunjukkan bahwa modifikasi demikian sangat kecil berpengaruh pada efisiensi OWC. Bahkan penambahan ketebalan dinding suatu struktur dapat meningkatkan koefisien refleksi dari elevasi muka air di depannya. Dalam penerapan OWC, hal ini tentunya merugikan karena dapat membatasi gelombang yang masuk ke dalam kolom air sehingga mengurangi elevasi muka air di dalam. Modifikasi pada draft dinding muka dapat merubah periode alamiah dan berdampak pada efisiensi OWC dengan signifikan (Morris-Thomas et al., 2007; He et al., 2016), serta membatasi transmisi energi gelombang karena energi gelombang terkonsentrasi dekat ke permukaan bebas (Xu et al., 2022). Penelitian ini merekomendasikan penggunaan *bell mouth* karena dapat mengurangi redaman akibat pembentukan *vortex* tanpa meningkatkan refleksi gelombang serta mengubah signifikan periode alamiahnya.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini memodelkan respons akibat gelombang datang pada kolom air yang berada di dalam sebuah *bottom-standing* OWC dengan penampang berbentuk L. Untuk memahami respons kolom air atau elevasi muka air di dalam OWC, pemodelan numerik berbasis metode volume hingga menggunakan perangkat lunak OpenFOAM telah diterapkan pada studi ini.

Beberapa periode gelombang telah diuji coba pada studi ini untuk mengetahui pengaruhnya. Hasilnya menunjukkan bahwa respons terbesar terjadi pada saat kondisi resonansi, yang ditandai dengan adanya perbedaan fase sebesar 90° antara elevasi muka air internal dan di luar OWC. Kondisi ini juga diperkuat dengan hasil prediksi periode alamiah *bottom-standing* OWC berdasarkan kedalaman air dan bukan kedalaman dinding muka OWC tersebut. Pengaruh viskositas air dan bentuk mulut OWC juga telah diinvestigasi. Hasilnya menunjukkan bahwa respons kolom air tidak dipengaruhi oleh viskositas air sehingga efek skala pada pemodelan OWC dengan skala yang kecil dapat diabaikan. Sebaliknya, bentuk mulut sangat mempengaruhi respons

kolom air. *Bell-mouthed* OWC memiliki respons kolom air yang lebih besar dibanding yang bermulut lurus. Hal ini menunjukkan bahwa *vortex* merupakan mekanisme redaman utama pada kolom air. Penggunaan *bell mouth* oleh karenanya direkomendasikan untuk mengurangi redaman pada kolom air sehingga dapat meningkatkan efisiensi *bottom-standing* OWC tanpa meningkatkan refleksi gelombang serta memodifikasi periode alamiahnya. Meskipun demikian, hasil ini perlu lebih diperdalam lagi dengan melihat penerapan *bell-mouthed* OWC pada rentang periode gelombang yang lebih luas termasuk pada saat kolom air tidak mengalami resonansi. Selain itu, validasi dengan hasil eksperimen fisik untuk membandingkan elevasi muka airnya dengan hasil simulasi perlu dilakukan untuk lebih memastikan tingkat keakuratannya analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Bangun, E. P., (2024a), Nonlinear forcing and motions of fixed cylindrical oscillating water columns, *Ocean Engineering*, 296, 116978.
- Bangun, E. P., (2024b), Radiated waves and rotational flows generated by cylindrical Oscillating Water Columns, *Applied Ocean Research*, 142, 103840.
- Bangun, E. P., and Murniza, T., (2024), Analisis pengaruh bentuk model *breakwater-integrated Oscillating Water Column*, *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 22, 22-32.
- Boccotti, P., (2007), Comparison between a U-OWC and a conventional OWC, *Ocean Engineering*, 34, 5-6.
- Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A., and Leong, A., (2017), Scaling and air compressibility effects on a three-dimensional offshore stationary OWC wave energy converter, *Applied Energy*, 189, 1-20.
- Elhanafi, A., and Kim, C. J., (2018), Experimental and numerical investigation on wave height and power take off damping effects on the hydrodynamic performance of an offshore stationary owc wave energi converter, *Renewable Energy*, 125, 518-528.
- Evans, D. V., and Porter, R., (1995), Hydrodynamic characteristics of an oscillating water column device, *Applied Ocean Research*, 17, 155-164.
- Falcão, A. F., (2000), The shoreline owc wave power plant at the azores, *Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference*, Denmark, December 2000.
- Falcão, A. F. O., and Henriques, J. C. C., (2016), Oscillating water column wave energy converters and air turbines: A review, *Renewable Energy*, 85, 1391-1424.
- Ferziger, J. H., and Peric, M., (2001), *Computational methods for fluid dynamics*, Ed.3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Gerhart, P. M., Gerhart, A. L., and Hochstein, J. I., (2016), *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons.
- He, F., Li, M., and Huang, Z., (2016), An experimental study of pile-supported owc-type breakwaters: energi extraction and vortex-induced energi loss, *Energies*, 9, 27.
- Heath, T. V., (2011), A review of oscillating water column, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370, 235-245.
- Hirt, C., and Nichols, B., (1981), Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- Issa, R., (1986), Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operators splitting, *Journal of Computational Physics*, 62, 40-65.
- Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., and Fredsoe, J., (2012), A wave generation toolbox for the open-source cfd library: Openfoam, *International Journal Numerical Methods Fluids*, 70.

- Le Mehaute, B., (1976), *An introduction of hydrodynamics and water waves*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Morris-Thomas, M. T., and Thiagarajan, K., (2007), An investigation into the hydrodynamic efficiency of an oscillating water column, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 129, 273-278.
- Ning, D. Z., Zhou, Y., Mayon, R., and Johanning, L., (2020), Experimental investigation on the hydrodynamic performance of a cylindrical dual-chamber oscillating water column device, *Applied Energy*, 20, 114252.
- Samak, M. M., Elgamal, H., and Nagib, A.M., (2021), The contribution of L-shaped front wall in the improvement of the oscillating water column wave energy converter performance, *Energy*, 22, 120421.
- Vyzikas, T., Deshoulières, S., Barton, M., Giroux, O., Greaves, D., and Simmonds, D., (2017), Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices, *Renewable Energy*, 104, 248-258.
- Wang, R. Q., Ning, D., Zhang, C. W., Zou, Q. P., and Liu, Z., (2018), Nonlinear and viscous effects on the hydrodynamic performance of a fixed OWC wave energy converter, *Coastal Engineering*, 131, 42-50.
- Xu, C., Liu, Z., and Tang, G., (2022), Experimental study of the hydrodynamic performance of a U-oscillating water column wave energy converter, *Ocean Engineering*, 25, 112598.
- Zhou, Y., Ning, D., Shi, W., Johanning, L., and Liang, D., (2020), Hydrodynamic investigation on an owc wave energy converter integrated into an offshore wind turbine monopile, *Coastal Engineering*, 12, 103731.
- Zhou, Y., Ning, D., Chen, L., and Iglesias, G., (2021a), Nonlinear hydrodynamic modeling of an offshore stationary multi-oscillating water column platform, *Ocean Engineering*, 227, 108919.
- Zhou, Y., Ning, D., Liang, D., and Qiao, D., (2021b), Nonlinear hydrodynamic analysis of an offshore oscillating water column wave energy converter, *Renewable Sustainable Energy Review*, 145, 1-15.