

Analisis pengaruh bentuk model *breakwater-integrated Oscillating Water Column*

E.P. Bangun*, T. Murniza

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan

Koresponden*, Email: emma.patricia@usu.ac.id

Info Artikel		Abstract
Diajukan	03 April 2024	<p><i>Oscillating water column is a wave energy converter that utilizes the upward and downward motion of the water column due to dynamic wave loading. There are two types of models considered in this study, namely conventional shape (L-OWC) and U-OWC. Numerical simulations of both OWC models employed Computational Fluid Dynamics and OpenFOAM solver. Comparisons between theoretical free-surface elevations and numerical wave tank based on the solver have proven the validity of the numerical model. This study has found that the L-OWC model has better performance in respect of RAO and hydrodynamic efficiency. Interestingly, the shape of water column has insignificant influence on the reflection coefficient under resonant condition. Numerical simulations of both OWC models operating at the Belawan shore have also been undertaken and indicated similar results. The L-OWC model has a higher hydrodynamic efficiency as much as 81.97% while the U-OWC obtains 10.8%.</i></p>
Diperbaiki	08 Juni 2024	
Disetujui	01 Juli 2024	

Keywords: owc, cfd, waves2foam, l-owc, u-owc.

Abstrak
Oscillating Water Column adalah jenis konverter energi gelombang yang memanfaatkan gerakan naik turun kolom air internalnya akibat beban dinamik gelombang laut. Ada dua jenis model yang dibahas dalam studi ini, yaitu bentuk konvensional (L-OWC) dan U-OWC. Simulasi numerik untuk kedua model OWC tersebut menggunakan *Computational Fluid Dynamics* dan *OpenFOAM solver*. Perbandingan hasil elevasi muka air teoritis dengan tangki gelombang numerik melalui *solver* tersebut membuktikan validitas pemodelan numeriknya. Studi ini menemukan bahwa model L-OWC memiliki performa yang lebih baik dari segi nilai RAO dan efisiensi hidrodinamisnya. Namun, bentuk kolom air tidak terlalu mempengaruhi koefisien refleksi dalam kondisi resonansi. Simulasi numerik kedua model OWC untuk kondisi perairan laut Belawan juga telah dilakukan dan mengindikasikan hal yang sama. L-OWC memperoleh nilai efisiensi hidrodinamik sebesar 81,97% sedangkan U-OWC bernilai 10,8%.

Kata kunci: owc, cfd, waves2foam, l-owc, u-owc.

1. Pendahuluan

Sejumlah prototipe *Wave Energy Converter* (WEC) telah dipatenkan dan dikembangkan untuk mengungkap potensi masa depan pembangkit listrik tenaga gelombang. Perangkat WEC dapat diklasifikasikan berdasarkan prinsip pengoperasiannya dalam mengubah energi gelombang menjadi listrik, yaitu: *Oscillating Water Column* (OWC), *Oscillating Bodies* dan *Overtopping* [1]. Tiga klasifikasi WEC tersebut dikelompokkan berdasarkan perbedaan prinsip kerja serta tipe interaksi antara alat konversi dan ombak laut. Dari sekian banyak inovasi perangkat WEC, OWC adalah tipe WEC yang paling berkembang karena telah dibangun di laut terbuka dan terbukti dapat menghasilkan energi listrik dari energi gelombang [2]. OWC merupakan sebuah WEC yang memiliki struktur berongga terbuka pada bagian bawahnya serta terendam dengan kedalaman tertentu dari permukaan air. Mekanisme kerja OWC adalah memampatkan dan merenggangkan aliran udara di atas ruang kolom air yang terperangkap di dalam struktur dan yang beresilasi oleh

karena adanya variasi pergerakan gelombang laut. Pergerakan aliran udara menyebabkan pergerakan turbin hingga menghasilkan energi listrik melalui generator listrik.

Dilihat dari segi bentuk kolom airnya, terdapat dua tipe model OWC yang dapat diimplementasikan pada perairan dekat garis pesisir pantai, yakni yang memiliki kolom air berbentuk konvensional (disebut juga L-OWC) atau menyerupai U (U-OWC) [3]. Model WEC yang terakhir ini memiliki kolom air internal dan eksternal. Dalam studi literatur dan penelitian sebelumnya, terdapat pengaruh perbedaan signifikan terhadap performa perangkat di dua tipe OWC tersebut. Model U-OWC dianggap lebih efisien apabila beroperasi dengan gelombang laut dan angin yang besar [4]. Bahkan, Boccotti [4] juga menyatakan bahwa bukaan dari U-OWC yang lebih dekat terhadap permukaan air bila dibandingkan dengan bukaan L-OWC menyebabkan U-OWC memiliki kinerja yang lebih baik untuk kondisi dengan rentang frekuensi gelombang yang luas.

Model U-OWC telah dibangun di pelabuhan Civita-vecchia yang berada di Roma, Itali [5]. OWC ini didesain memiliki dual fungsi, yaitu sebagai WEC dan breakwater, agar biaya investasi sehubungan dengan konstruksi dapat dimanfaatkan secara optimal. Berdasarkan data dari 300 rekaman, Arena dkk. [5] sendiri mencatat bahwa U-OWC tersebut dapat menyerap rata-rata 66% energi gelombang dan menghasilkan sekitar 5,7 kW/m energi listrik.

Sehubungan dengan upaya memahami kinerja dari sebuah OWC, beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan tangki gelombang numerik (*numerical wave tank*) untuk mensimulasikan perilaku gelombang serta interaksinya dengan konverter energi gelombang [6-8]. Pemodelan numerik diyakini sebagai metode yang ampuh untuk memprediksi dan memvisualisasikan perilaku dinamis dari sistem dengan memecahkan persamaan-persamaan pengatur secara diskrit atau numerik. Dari sekian opsi pemodelan numerik, *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah suatu pemodelan yang memecahkan persamaan Navier-Stokes untuk memprediksi kecepatan, tekanan serta elevasi muka air pada fluida nyata (fluida viskos, tak mampu mampat serta dapat berotasi). Ada dua hal yang dapat dipandang sebagai kelebihan pemodelan ini. Pertama, CFD menerapkan metode volume hingga dengan sistem *collocated grid* dan *boundary-fitted mesh* sehingga dapat digunakan untuk mempelajari perilaku dinamika fluida yang melewati struktur laut dengan bentuk kompleks sekalipun [7-10]. Selain itu, CFD dapat diimplementasikan dengan *volume of fluid* untuk memprediksi gerakan permukaan air baik yang kecil (linear) maupun yang ekstrim (tak linear) seperti pada gelombang pecah. Hal ini tentunya memberikan gambaran visual akurat terhadap interaksi gelombang laut dengan struktur OWC dengan berbagai kondisi parameter gelombang.

Vyzikas dkk. [3] sebelumnya telah meneliti performa U-OWC dan L-OWC dengan menggunakan percobaan fisik. Namun, penelitian lanjutan disarankan untuk memahami lebih detail pengaruh bentuk kolom air dari struktur OWC terhadap performa dan elevasi muka air di sekitarnya. Tujuan penelitian sekarang adalah menganalisa hal ini melalui pemodelan CFD. Selain itu, studi ini juga bertujuan untuk menginvestigasi potensi implementasi kedua model OWC tersebut pada perairan laut Belawan sehingga dapat mengetahui bentuk OWC yang tepat untuk diaplikasikan. Dalam hal ini, data karakteristik gelombang diperoleh dari situs Copernicus. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini memanfaatkan *waves2Foam* [11], yaitu sebuah CFD *solver* turunan dari OpenFOAM yang berbasis metode volume hingga sekaligus bersifat *open source*.

2. Metode

2.1 Persamaan Pengatur

Persoalan pemodelan interaksi gelombang dengan U-OWC dan L-OWC dilakukan dalam sistem dua dimensi. Hal ini dibenarkan mengingat penampang melintang kolom airnya yang berbentuk persegi panjang dan dimensinya yang memiliki arah tegak lurus terhadap arah gelombang datang diketahui jauh melebihi dimensinya yang lain. Persamaan pengaturnya, yaitu Persamaan Navier-Stokes, diekspresikan ke dalam Persamaan (1)-(3).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + \frac{1}{\rho} g \quad (3)$$

di mana t adalah waktu sesaat, ν adalah viskositas kinematik, ρ masa jenis air dan g adalah percepatan gravitasi. Dalam pemodelan ini, sistem koordinat kartesius x, z diterapkan dengan z positif berlawanan arah dengan arah gaya gravitasi dan $z=0$ berada tepat di muka air diam, sedangkan u dan w masing-masing adalah komponen kecepatan dalam arah sumbu x dan z .

Untuk memprediksi gerak permukaan air, metode berdasarkan *volume of fluid* [12] diterapkan. Metode ini menggunakan satu variabel tambahan, yaitu indikator fase, α , yang merepresentasikan persentase air di dalam satu *control volume* (CV) dan bernilai $\alpha = 1$ apabila sepenuhnya diisi oleh air atau diantara $0 < \alpha < 1$ jika berada di permukaan air. Persamaan (4) menyatakan transportasi dari variabel α untuk memprediksi gerak muka air.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \alpha \nabla \cdot u + \nabla \cdot u_r \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (4)$$

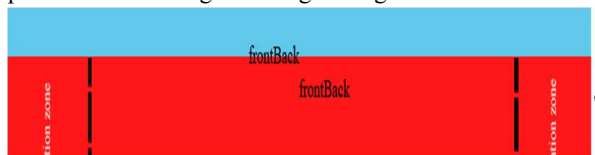
di mana u_r adalah yang dinamakan *compression velocity* dan diperlukan untuk memperoleh permukaan bebas yang tajam.

OpenFOAM® ditulis dalam bahasa pemrograman C++ yang memungkinkan pembuatan aplikasi yang terbagi dalam dua kategori, yaitu *Solvers*, yang dirancang untuk memecahkan masalah tertentu dan *Utilities*, yang berfungsi untuk melakukan tugas-tugas yang melibatkan pembuatan *mesh* dan manipulasi data. Paket OpenFOAM® biasanya dikompilasi dalam sistem operasi Linux. Dalam penelitian ini digunakan OpenFOAM® v.3 yang dipasang pada sistem UBUNTU 14.04LTS 64 bit. Komputer yang digunakan memiliki prosesor Intel® Core™ i3-8130U CPU @ 2.20 GHz × 4 core dengan RAM 4GB. Terdapat dua jenis *solver* pada OpenFOAM untuk penyelesaian persoalan yang melibatkan berbagai fase (*multiphase problem*), yaitu *interFoam* yang diterapkan bagi mesh statis dan *interDyMFoam* untuk yang dinamis. Kedua *solver* ini menggunakan

algoritma PIMPLE, yang merupakan kombi-nasi dari algoritma PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operator*) [13] dan SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) [14] untuk memastikan lapangan kecepatan yang diprediksi dari persamaan konservasi momentum mematuhi persamaan kontinuitas. Algoritma ini tepat digunakan pada *transient problem* yang bergantung pada waktu. Oleh karena fokus penelitian kali ini adalah memodelkan U-OWC dan L-OWC yang pada dasarnya memiliki struktur yang dipasang statis di atas dasar perairan, interFoam dan PIMPLE diterapkan untuk memprediksi elevasi muka air dari waktu ke waktu.

2.2 Numerical Wave Tank

Numerical Wave Tank (NWT) merupakan penyederhanaan situasi dari gelombang laut nyata yang dibuat berbentuk tangki di mana di dalamnya perambatan gelombang akan disimulasikan. **Gambar 1** menunjukkan domain komputasi dari sebuah NWT yang dibatasi oleh *inlet*, *outlet*, *atmosphere*, *bottom* dan *frontBack*. Gelombang menjaral masuk melewati batas *inlet* dan keluar melewati batas *outlet*. Jika batas atas NWT yaitu *atmosphere* dibuat menyerupai udara bebas, batas bawah *bottom* didefinisikan sebagai batas solid yang tak permeabel. Batas depan dan belakang NWT yaitu *frontBack* dibuat melingkupi satu *control volume* karena pemodelan dilakukan dalam dua dimensi. Lebar NWT, *w*, ditetapkan sebesar 0,1 m. Dalam memodelkan gelombang datang, waves2Foam berfungsi untuk menetapkan kondisi batas dari variabel *u*, *w* dan α pada *inlet* berdasarkan teori gelombang yang dipilih. Dengan memasukkan data tinggi gelombang, *H*, periode gelombang, *T*, dan kedalaman perairan, *h*, model dari NWT dibuat memiliki panjang sebesar $4,0-5,5\lambda$, di mana λ adalah panjang gelombang berdasarkan persamaan dispersi [15]. Untuk mengurangi efek refleksi gelombang akibat pantulan gelombang baik pada *inlet* dan *outlet*, *waveRelaxation zone* ditetapkan dengan dimensi panjangnya sebesar $1,5\lambda$ di dekat *inlet* dan λ sebelum *outlet*. Penetapan ini sejalan dengan Bangun [8] dan Jacobsen dkk. [16] untuk mencapai persentase refleksi gelombang kurang dari 1%.



Gambar 1. Skema NWT dengan kondisi batas

2.3. Ukuran mesh dan jenis kondisi batas

Dalam menganalisis pergerakan gelombang laut berdasarkan *Stokes' first order wave theory* atau dikenal juga sebagai teori gelombang linear [15], elevasi muka air sewaktu-waktu, η , dinyatakan ke dalam Persamaan (5).

$$\eta(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \tag{5}$$

Menurut *Stokes' second order wave theory* [15] untuk pergerakan gelombang tak linier, η mengikuti Persamaan (6).

$$\eta(x, t) = A \sin(kx - \omega t) - \frac{A^2 k}{2} \cos 2(kx - \omega t) \tag{6}$$

di mana *A* adalah amplitudo gelombang didefinisikan sebagai $H/2$, sedangkan *k* dan ω masing-masing adalah bilangan gelombang dan frekuensi sudut yang diekspresikan sebagai $2\pi/T$. Validitas dari suatu teori gelombang untuk setiap kondisi parameter gelombang dapat dievaluasi dengan grafik Le Méhauté [17].

Untuk memastikan bahwa pemodelan yang dibuat sudah benar, maka dilakukan beberapa kali uji coba NWT dengan *mesh* yang berbeda. *Mesh* dibagi ke dalam tingkat dua kali lipat demi memastikan nilai *mesh* yang dipakai semakin mendekati hasil konvergen. Adapun *mesh* dengan jenis *hexahedral* digunakan dalam pemodelan ini memiliki keunggulan efisiensi jumlah *cell*, namun kelemahan utamanya terdapat pada kesulitan dalam membentuk geometri yang rumit.

Dalam pemodelan ini dibuat menjadi tiga macam tingkatan *mesh* dengan ukuran *mesh* yang berbeda, yaitu *mesh* dengan ukuran *coarse*, *medium*, dan *fine*. Ukuran dari elemen *mesh* mempengaruhi jumlah elemen *mesh* yang terbentuk. Semakin kecil elemen yang terbentuk, semakin banyak jumlah elemeh *mesh*. Pembagian ukuran horisontal, Δx , dan vertikal, Δz , dari CV pada *mesh* di daerah dekat permukaan bebas dapat dilihat pada **Tabel 1**. Pembuatan *mesh* dengan ukuran medium dan fine dilakukan dengan melakukan *local refinement* pada area di dekat permukaan bebas. **Gambar 2** menunjukkan contoh *refinement* pada ukuran medium, di mana daerah berwarna merah dengan α .water atau α bernilai 1 mengindikasikan air, sedangkan biru menandakan udara.

Tabel 1. Ukuran vertikal dan horizontal dari CV

Dimensi mesh	Coarse mesh	Medium Mesh	Fine mesh
Δz	$H/4$	$H/8$	$H/16$
Δx	$\lambda/120$	$\lambda/240$	$\lambda/480$

Tingkat konvergensi semakin baik dengan meningkatnya kepadatan *mesh*. Namun, perhitungan komputasi akan lebih lama karena meningkatnya jumlah CV. Selain itu, untuk mengurangi disipasi numerik, ratio antar ukuran horizontal

dan vertikal dari satu CV pada permukaan bebas diupayakan berkisar di antara $1 \leq \Delta x/\Delta z \leq 2$ [8, 9].

Di dalam OpenFOAM terdapat *mesh generator* sederhana yaitu blockMeshDict yang didefinisikan di dalam direktori *system*. Domain didefinisikan menggunakan blok yang lokasi verteksnya dijabarkan di dalam file tersebut.

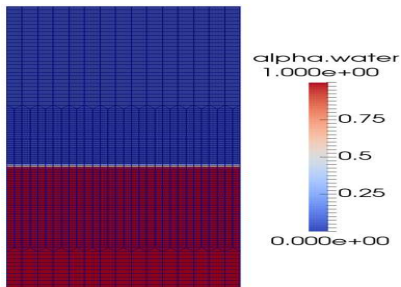
Setelah pembuatan *mesh* selesai, pengaturan kondisi batas harus dilakukan mengikuti persamaan pengatur yang telah diatur oleh software. Jenis-jenis *boundary condition* adalah:

1. *FixedValue* (FV) apabila nilai variabel diketahui/-ditetapkan,
2. *ZeroGradient* (ZG) di mana gradient (kemiringan) variabel terhadap spasi ditetapkan sebesar nol,
3. *TotalPressure* (TP) jika nilai tekanan diketahui/-ditetapkan,
4. *Empty* (E) yang digunakan untuk pemodelan dua dimensi dan
5. *noSlip* untuk menetapkan bahwa kecepatan tangential sebesar 0 pada *boundary wall* atau dinding.

Tabel 2 menyatakan jenis kondisi batas untuk setiap variabel yang berlaku pada masing-masing batas yang telah dinamakan sebelumnya pada **Gambar 1**. Pada *atmosphere*, *pressure* ditetapkan sebesar tekanan atmosfer.

Tabel 2. Jenis Kondisi Batas Yang Berlaku

Variabel	<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	<i>atm.</i>	<i>bottom</i>	<i>frontBack</i>
u, w	FV	FV	ZG	FV	E
α	ZG	ZG	ZG	ZG	E
p	ZG	ZG	TP	ZG	E



Gambar 2 Contoh mesh dengan local *refinement* pada ukuran medium di dalam NWT

2.3 Jenis Kasus

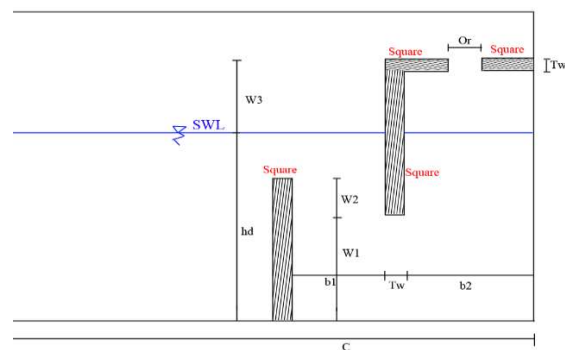
Computational domain untuk penelitian ini mengambil dari desain dan parameter yang digunakan dalam penelitian Vyzikas dkk. [3]. **Tabel 3** menunjukkan parameter tinggi, H , dan frekuensi gelombang regular, f , yang diterapkan dalam mensimulasikan NWT. Simulasi dilakukan mulai dari *initially still water condition*, yaitu ketika muka air di awal

tenang dan tidak terganggu sampai NWT mencapai *fully developed wave condition*, yaitu kondisi terbentuknya gelombang yang stabil di sepanjang arah propagasi gelombang.

Tabel 3. Parameter Tinggi dan Frekuensi Gelombang

H (m)	f (Hz)
0,122	0,570
0,096	0,510
0,088	0,465
0,159	0,385

Selain pemodelan NWT, penelitian sekarang bertujuan menganalisa pengaruh bentuk kolom air dari OWC. Terdapat dua tipe model yang menjadi objek penelitian kali ini, yaitu L-OWC dan U-OWC. Dengan merujuk kepada Vyzikas dkk. [3], desain dari pemodelan tangki telah ditentukan dimensinya. Berbeda pada pemodelan NWT tanpa struktur OWC, pemodelan U-OWC dan L-OWC di dalam NWT menggunakan strategi *initial wave condition* dalam file bernama *waveProperties.input*. Kondisi ini menyatakan bahwa gelombang sudah mencapai *fully developed wave condition* di dalam NWT sehingga tidak perlu menunggu waktu yang lama agar respons kolom air di dalam OWC terhadap gelombang mencapai *steady state*. Selain itu, sebuah *patch* yang diberi nama *square* didefinisikan untuk menyatakan keberadaan struktur OWC yang berupa dinding solid (lihat **Gambar 3**). Dalam hal ini, kondisi batas pada *square* identik dengan pada *bottom*. Adapun dimensi pada struktur U-OWC telah disajikan pada **Tabel 4**. Kedalaman air, h , ditetapkan sebesar 0,75 m.



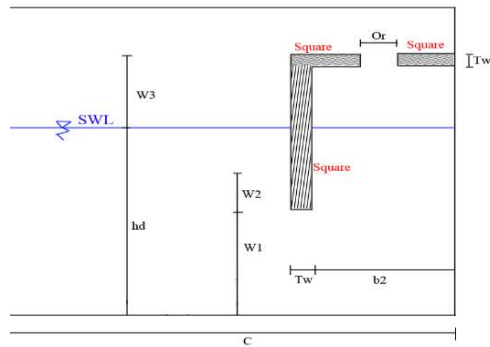
Gambar 3. Skematis struktur U-OWC di NWT

Sedangkan untuk model L-OWC, **Gambar 4** menunjukkan skematisnya di dalam NWT dan **Tabel 5** mendeskripsikan ukurannya. Adapun dimensi ukuran kolom air pada struktur L-OWC masih menggunakan dimensi

ukuran yang diterapkan pada struktur kolom U-OWC tetapi tidak memiliki dinding depan.

Tabel 4. Ukuran Geometri U-OWC Dalam Satuan Meter

<i>Or</i>	0,015
<i>Tw</i>	0,024
<i>b1</i>	0,143
<i>b2</i>	0,285
<i>W1</i>	0,268
<i>W2</i>	0,286
<i>W3</i>	0,494
<i>hd</i>	0,75



Gambar 4. Skematis struktur L-OWC di NWT

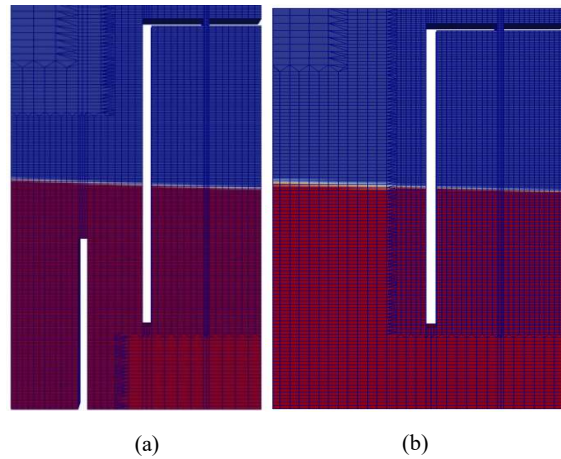
Tabel 5 Ukuran Geometri L-OWC Dalam Satuan Meter

<i>Or</i>	0,015
<i>Tw</i>	0,024
<i>b2</i>	0,285
<i>W1</i>	0,268
<i>W2</i>	0,286
<i>W3</i>	0,494
<i>hd</i>	0,75

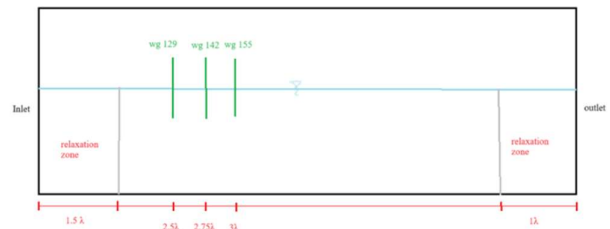
Konfigurasi mesh untuk model U-OWC dan L-OWC ditunjukkan masing-masing pada **Gambar 5(a)** dan **(b)**. *Local refinement* diterapkan untuk daerah di struktur OWC dan permukaan air. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil simulasi yang baik dari elevasi muka air internal baik di dalam dan di luar OWC.

Di dalam pemodelan numerik, pengambilan sampel permukaan untuk mengukur tinggi gelombang atau elevasi muka air pada waves2Foam menggunakan *utility* yang disebut *surfaceWaveField*. *Utility* ini berfungsi sebagai *wave gauge* (WG) dan ditempatkan di sepanjang aliran gelombang untuk mendapatkan deret waktu dari perubahan elevasi muka air di permukaan bebas. Semua WG harus didefinisikan di

dalam domain komputasi, karena komputasi akan terhenti tanpa penjelasan apa pun jika satu atau beberapa WG berada di luar domain komputasi. **Gambar 6** menunjukkan contoh penempatan WG 129, WG 142 dan WG 155 untuk mengukur elevasi muka air di dalam tangki. Jarak antar tiap WG ditetapkan sebesar $1/4\lambda$. Jarak antara inlet dan WG129 ditetapkan sebesar 4λ .



Gambar 5. Konfigurasi mesh di sekitar (a) U-OWC dan (b) L-OWC



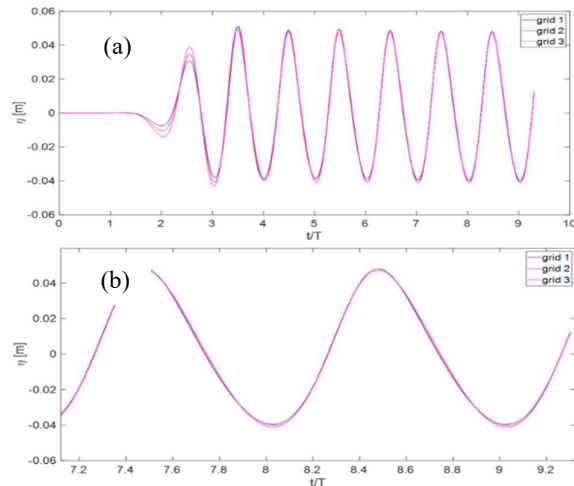
Gambar 6. Skema NWT dan penempatan WG

3 Hasil dan Pembahasan

3.1. Convergence study

Untuk memastikan validitas pemodelan yang dibuat dan ukuran CV yang tepat dalam pemodelan, studi konvergensi perlu dilakukan. **Gambar 7** menunjukkan elevasi muka air, η , di dalam NWT pada WG 129 dari waktu ke waktu dengan menggunakan *coarse mesh* (selanjutnya disebut grid 1), *medium mesh* (grid 2), dan *fine mesh* (grid 3) ketika tinggi gelombang, H , dan frekuensinya, f , masing-masing ditetapkan sebesar 0,088 m dan 0,465 Hz di batas *inlet*. **Gambar 7(a)** menunjukkan bahwa amplitudo elevasi muka air mulai stabil dari waktu $t = 5T$ karena amplitudo ini relatif konstan dari waktu ke waktu. Hal ini berarti tidak ada kontaminasi akibat refleksi gelombang dan mengindikasikan

bahwa *waveRelaxation zone* telah berfungsi dengan baik dalam meredam pantulan akibat batasan dalam panjang domain NWT. Selanjutnya, karena hasil simulasi mulai dari grid 1 terlihat semakin mendekati hasil pada grid 3, terutama pada *wave trough* (elevasi minimum), simulasi dapat dikatakan menuju kondisi konvergen. Agar menghemat waktu simulasi, grid 2 ($\Delta z=H/8$ dan $\Delta x=\lambda/120$) akan digunakan untuk melakukan simulasi selanjutnya.



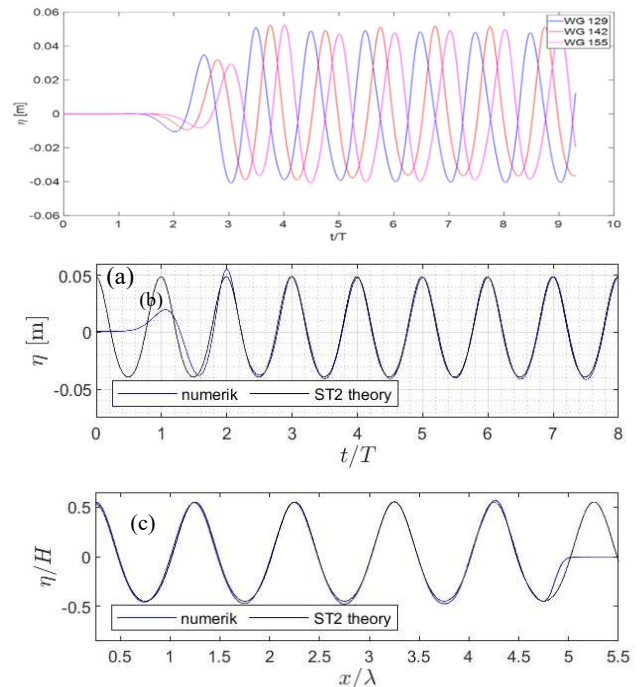
Gambar 7. (a) Elevasi muka air dengan menggunakan berbagai mesh dan (b) Tampak dekat hasil simulasi

Gambar 8(a) membuktikan bahwa simulasi yang dijalankan sudah diproses dengan benar. Hal ini terlihat dari perbedaan fase elevasi pada WG 129, 142 dan 155. Sebelumnya telah dijelaskan bahwa jarak antar tiap WG adalah $1/4\lambda$ dan WG 129 berada paling kiri dari ketiganya. Info ini mengindikasikan bahwa: (i) perbedaan fase antara WG 129 dan 142 adalah $\pi/2$, yang artinya ketika elevasi maksimum (atau minimum) pada WG 129, elevasi di lokasi WG 142 berada pada $z=0$, dan (ii) perbedaan fase antara WG 129 dan 155 adalah π , yang berarti elevasi maksimum terjadi di WG 129 ketika elevasi minimum di WG 155 atau sebaliknya. **Gambar 8(a)** membuktikan bahwa fase gelombang dapat diprediksi dengan akurat.

Selanjutnya, perbandingan hasil analitik berdasarkan *Stokes' second order wave theory* (ST2 theory) dengan hasil simulasi numerik di mana kondisi inletnya juga didefinisikan dengan teori gelombang yang sama ditunjukkan pada **Gambar 8(b)**. Hasilnya menunjukkan fase gelombang tidak jauh berbeda meskipun terdapat perbedaan amplitudo elevasinya. Berdasarkan Persamaan (7), persentase perbedaan antara hasil teoritis dengan numerik adalah sebesar 7,7%. Bahkan, konsistensi nilai amplitudo elevasi di sepanjang NWT pada suatu waktu dengan *fully developed*

wave condition terlihat dari **Gambar 8(c)**. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh disipasi numerik akibat *spurious air velocity* pada elevasi muka air dapat diabaikan.

$$Err = \frac{hasil\ numerik - hasil\ teoritis}{hasil\ teoritis} \times 100\% \quad (7)$$



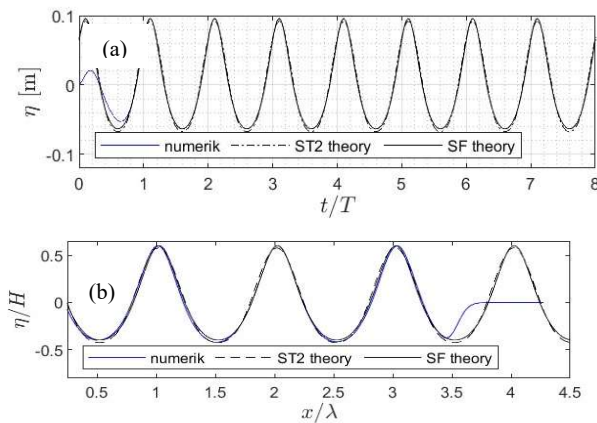
Gambar 8. (a) Perbandingan elevasi diprediksi pada WG yang berbeda, (b) Perbandingan hasil numerik dengan analitik berdasarkan ST2 theory sebagai fungsi waktu, t , dan (c) sebagai fungsi spasi, x , di sepanjang NWT untuk kondisi gelombang dengan $H=0.088$ m dan $f=0.465$ Hz

Hasil numerik dan analitik untuk kondisi gelombang lain dalam Tabel 3, yaitu $H=0,159$ m dan $f=0,385$ Hz, juga dilakukan. Berdasarkan grafik Le Méhauté [17], validitas teori gelombang berada di dekat perbatasan *Stokes' second order* (ST2 theory) dan *Streamfunction wave theory* (SF theory). Hasil numerik dengan definisi SF theory di batas inlet serta perbandingannya dengan analitik berdasarkan kedua teori gelombang tersebut ditunjukkan pada **Gambar 9(a)**. Hasilnya menunjukkan kesesuaian yang baik, dengan penyimpangan terbesar adalah antara perbandingan hasil numerik dengan ST2 theory sebesar 6%. Konsistensi amplitudo dan fase elevasi juga terlihat pada **Gambar 9(b)** yang sekaligus membuktikan kecilnya efek disipasi numerik pada permukaan bebas.

3.1. Pemodelan OWC dan pengaruh bentuk kolom

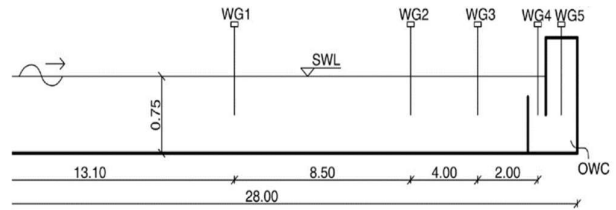
Konversi energi tekanan udara di ruang OWC menjadi listrik dilakukan dengan mekanisme *power-take-off* (PTO),

yang dalam kasus OWC biasanya berupa turbin. Karena mempunyai tingkat kerumitan yang tinggi apabila turbin ikut serta dimodelkan di dalam NWT, maka mekanisme PTO disimulasikan melalui penggunaan *orifice* pada dinding di atas muka air kolom [7,8,18]. Ketika kolom air berosilasi maka sebagian energi hilang akibat *vortex* dan sebagiannya lagi diserap oleh OWC karena dikonversi menjadi energi listrik. Proses penyerapan energi ini dimodelkan sebagai energi udara yang diredam ketika udara melewati *orifice* tersebut. Ukuran *orifice* menentukan besarnya redaman. Dalam penelitian ini, ukuran panjangnya ditetapkan sebesar 1,5 cm dengan lebarnya sama dengan lebar NWT. Dengan demikian, persentase luas *orifice* terhadap luas penampang kolom air adalah sebesar 5,24%. Waktu komputasi yang dibutuhkan untuk menyelesaikan simulasi selama 4-7 periode gelombang tergantung untuk satu kasus dengan menggunakan spesifikasi komputer memori RAM 4 GB dengan 4 jumlah processor adalah sekitar 2-3 hari. Penelitian ini menggunakan fasilitas komputer yang tersedia di laboratorium Komputasi Teknik Sipil USU.



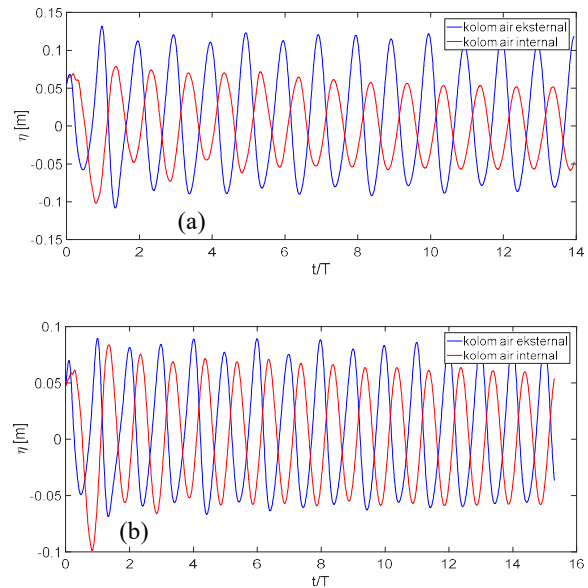
Gambar 9. (a) Perbandingan hasil numerik dengan analitik berdasarkan ST2 theory dan SF theory sebagai fungsi waktu, t , dan (b) sebagai fungsi spasi, x , di sepanjang NWT untuk kondisi gelombang dengan $H=0,159$ m dan $f= 0,385$ Hz

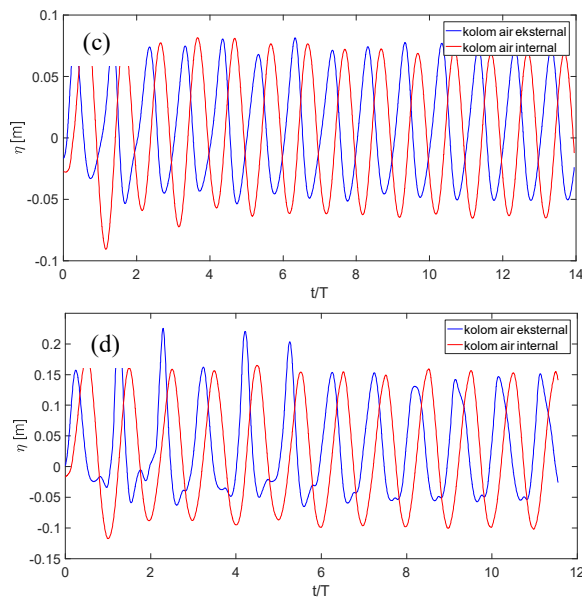
Selanjutnya adalah penetapan titik tinjau (lokasi WG) untuk elevasi muka air di dalam U-OWC yang dapat dilihat pada **Gambar 10**. WG5 mengacu kepada kolom air internal dan WG4 kolom air eksternal. Istilah yang sama dan lokasi yang sama juga berlaku untuk investigasi pada L-OWC. Namun, istilah kolom air eksternal pada L-OWC mengacu pada posisi di dekat bagian depan dinding struktur OWC.



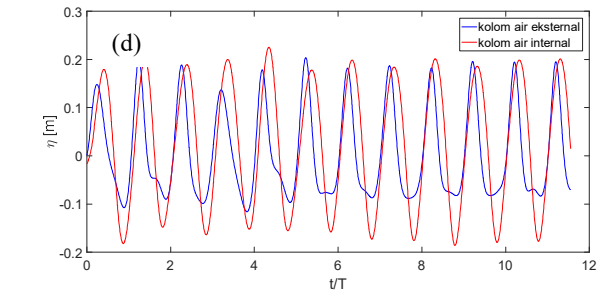
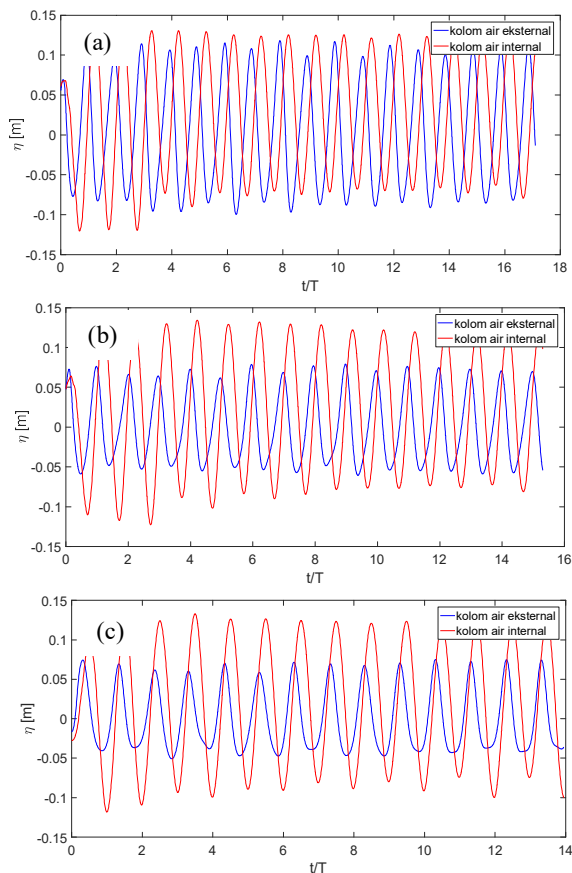
Gambar 10. Lokasi tinjauan WG

Gambar 11 menunjukkan perbedaan fase antara elevasi muka air pada kolom air internal (WG 5) dan eksternal (WG 4) dari U-OWC dari berbagai kondisi parameter gelombang berdasarkan **Tabel 3** sebelumnya. Sebagai contoh, ketika frekuensi sebesar $f=0,57$ Hz, beda fase bernilai sekitar π . Seiring dengan berkurangnya nilai frekuensi, beda fase berkisar $\pi/2$ pada $f=0,39$ Hz. Perlu dicatat bahwa ketika beda fase kedua elevasi mencapai $\pi/2$, kolom air internal mengalami kondisi resonansi, yaitu suatu kondisi di mana terjadi osilasi yang signifikan yang sebenarnya diinginkan terjadi untuk mencapai performa konversi energi yang tinggi. Pada kasus L-OWC, kondisi resonansi tercapai ketika $f=0,47$ Hz, sedikit lebih tinggi dari kasus sebelumnya pada U-OWC (lihat **Gambar 12**). Ketika $f=0,39$ Hz, beda fase hampir mendekati 0, yang artinya kolom air di dalam L-OWC sefase (atau seirama) dengan muka air yang ada di depannya.





Gambar 11. Elevasi muka air di kolom air internal (WG5) dan eksternal (WG4) dari U-OWC ketika frekuensi gelombang, f , sebesar: (a) 0,57 Hz, (b) 0,51 Hz, (c) 0,47 Hz dan (d) 0,39 Hz



Gambar 12. Elevasi muka air di kolom air (WG5) dari L-OWC ketika frekuensi gelombang, f , sebesar: (a) 0,57 Hz, (b) 0,51 Hz, (c) 0,47 Hz dan (c) 0,39 Hz

Perbedaan fenomena dari kedua model OWC tersebut dapat dijelaskan berdasarkan Persamaan (8), yang menyatakan secara garis besar frekuensi sudut alamiah OWC, ω_n .

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{L_{OWC}}} \quad (8)$$

di mana L_{OWC} adalah panjang kolom air yang besarnya pada U-OWC adalah penjumlahan panjang kolom air internal, $L_{WC, internal}$, dan panjang kolom air eksternal, $L_{WC, eksternal}$.

$$L_{OWC} = L_{WC, internal} + L_{WC, eksternal} \quad (9)$$

Perlu dicatat bahwa persamaan (8)-(9) tidaklah akurat dalam memprediksi frekuensi alamiah OWC oleh karena terdapat faktor penentu lain, yaitu massa tambahan (*added mass*) yang dipengaruhi oleh redaman akibat vortex [9] dan PTO [3] serta luas permukaan kolom air [9]. Meskipun demikian, tergambar dari persamaan tersebut bahwa frekuensi sudut alamiah pada U-OWC lebih kecil bila dibandingkan pada L-OWC. Berdasarkan pengertian ini dan hubungan dari $\omega = 2\pi f$ dapat dimengerti mengapa U-OWC mengalami kondisi resonansi ketika frekuensi gelombang datang, f , lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai f pada kasus L-OWC.

3.2. Response Amplitude Operator dan efisiensi hidrodinamik

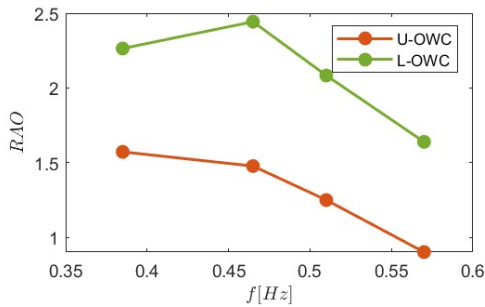
Response Amplitude Operator (RAO) adalah parameter yang mengindikasikan besar faktor amplifikasi akibat beban dinamik seperti gelombang pada kolom air internal dan dapat dinyatakan sebagai Persamaan (10):

$$RAO = \frac{\text{amplitudo dari kolom air internal OWC}}{\text{amplitudo gelombang datang}} \quad (10)$$

Suatu sistem ketika mengalami kondisi resonansi maka nilai RAOnya akan maksimum.

Gambar 13 menunjukkan kurva *RAO* terhadap frekuensi gelombang untuk kedua model OWC. Terlihat bahwa *RAO* pada U-OWC menuju nilai maksimum di daerah frekuensi lebih rendah bila dibandingkan pada L-OWC, yang mencapai nilai *RAO* maksimum ketika frekuensi gelombang bernilai $f=0,47$ Hz. Hal ini sejalan dengan pemahaman sebelumnya.

RAO memiliki nilai puncak ketika kolom air internal mengalami kondisi resonansi, yang terjadi ketika frekuensi gelombang mendekati frekuensi alamiahnya dan terlihat dari perbedaan fase antara elevasi muka air pada kolom air internal dan di depannya yang sebesar $\pi/2$ (lihat kembali **Gambar 12(c)**).



Gambar 13. Variasi *RAO* terhadap frekuensi gelombang yang terjadi pada U-OWC dan L-OWC

Mengikuti Kamath dan Elhanafi [6],[7], efisiensi hidrodinamik dari sebuah OWC, ϵ , dapat dievaluasi dengan Persamaan (11).

$$\epsilon = \frac{P_{abs}}{P_{inc.w}} \tag{11}$$

di mana w adalah lebar OWC, dan P_{abs} adalah daya yang diserap oleh OWC, sedangkan P_{inc} daya gelombang datang yang masing-masing dapat diekspresikan sebagai Persamaan (12)-(14).

$$P_{abs} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t)S_c dt \tag{12}$$

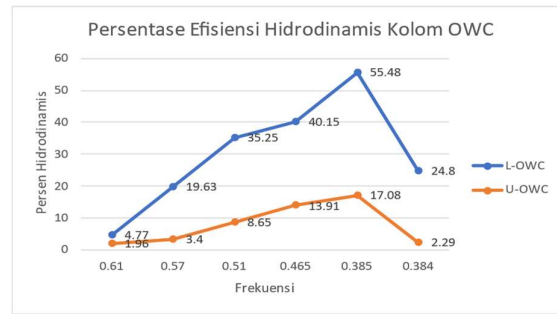
$$P_{inc} = \frac{1}{8} w \rho g H^2 c_g \tag{13}$$

$$c_g = \frac{\omega}{k} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \tag{14}$$

Dalam hal ini, $p(t)$ dan $v(t)$ masing-masing adalah tekanan dan kecepatan udara di atas kolom air internal, S_c luas penampang kolom airnya, c_g kecepatan grup gelombang dan k adalah bilangan gelombang. Tekanan udara dari waktu ke waktu, $p(t)$, diambil dari hasil *sampling utility* yang tersedia pada OpenFOAM, sedangkan kecepatan udara, $v(t)$, dievaluasi berdasarkan kecepatan perubahan elevasi muka air dari kolom internal. Hal ini berlaku untuk udara yang diasumsikan sebagai *incompressible fluid* [6-8] dan dapat dijustifikasi karena skala dari OWC yang dimodelkan dalam studi ini kecil. Kompresibilitas udara menjadi faktor penting bila analisa dilakukan pada ukuran/skala OWC yang sebenarnya (*full scale*).

Gambar 14 menunjukkan efisiensi hidrodinamik, ϵ , dari kedua model OWC sebagai fungsi dari frekuensi gelombang. Sejalan dengan kurva *RAO*, efisiensi hidrodinamik pada L-

OWC lebih superior untuk semua kondisi frekuensi gelombang, yang artinya lebih banyak energi gelombang yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik pada L-OWC. Efisiensi hidrodinamik maksimum yang diperoleh melalui L-OWC adalah 55,48%. Hal ini berarti setengah dari energi gelombang dapat diserap dan dikonversi menjadi energi listrik.



Gambar 14. Variasi efisiensi hidrodinamik, ϵ , terhadap frekuensi gelombang yang terjadi pada U-OWC dan L-OWC

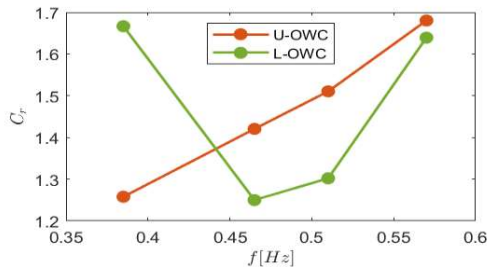
Bukaan mulut dari kolom air eksternal pada U-OWC lebih mendekati permukaan bebas dibandingkan bukaan mulut pada L-OWC sehingga diekspektasikan terdapat konsentrasi energi yang lebih tinggi yang tersedia pada U-OWC. Namun, nilai *RAO* dan efisiensi hidrodinamis pada model U-OWC justru lebih rendah untuk semua kondisi frekuensi gelombang. Hal ini mungkin berkaitan dengan energi yang hilang akibat vortex yang terjadi pada kedua ujung struktur U-OWC yang terendam. Pada L-OWC, pembentukan vortex hanya terjadi pada satu ujung strukturnya. Selain itu, ujung struktur dari U-OWC yang semakin dekat ke permukaan bebas tentunya semakin mendukung terjadi pembentukan vortex yang lebih signifikan pada struktur OWC tersebut. Hal ini dikarenakan amplitudo kecepatan fluida sebagai penggerak terbentuknya vortex semakin meningkat ketika berada semakin dekat ke permukaan bebas akibat intensnya pengaruh gelombang.

3.3. Koefisien refleksi dan modulasi elevasi muka air

Selain efisiensi hidrodinamik, sebuah OWC yang diintegrasikan ke dalam struktur pemecah gelombang (*breakwater*) dinilai kinerjanya berdasarkan koefisien refleksi, C_r . Tentunya yang diinginkan adalah koefisien refleksi yang rendah agar tidak terjadi limpasan air yang dapat melewati badan atas dari *breakwater*. Koefisien refleksi dari U-OWC dan L-OWC pada setiap frekuensi gelombang dapat dievaluasi berdasarkan Persamaan (15).

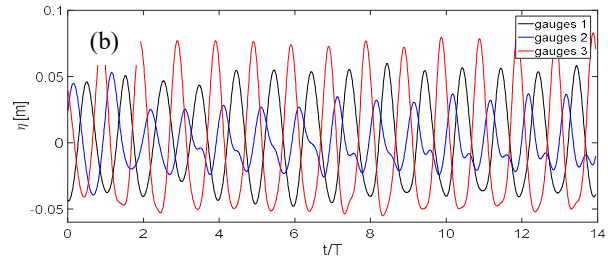
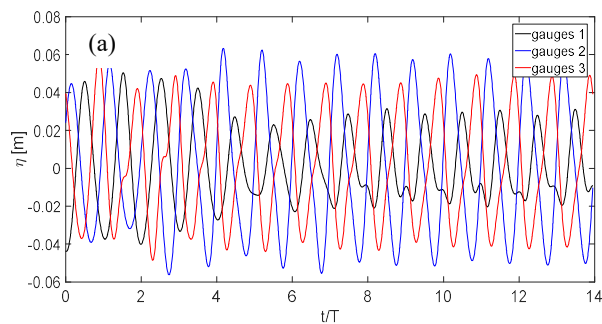
$$C_r = \frac{H_{WG4}}{H} \tag{15}$$

di mana H_{WG4} adalah tinggi elevasi muka air yang diukur pada WG4 di depan dinding OWC. Berdasarkan **Gambar 11** dan **12**, kurva C_r terhadap frekuensi gelombang dievaluasi dan hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 15**. Nilai C_r dari kedua OWC terlihat menurun ketika kolom air internal dalam kondisi resonansi. Sebelumnya dari beda fase elevasi diketahui bahwa kondisi resonansi terjadi pada L-OWC ketika frekuensi gelombang bernilai $f=0.47$ Hz dan terjadi pada U-OWC ketika $f=0.39$ Hz. Hasil nilai koefisien refleksi dalam kondisi resonansi pada kedua model OWC menunjukkan nilai yang tidak terlalu berbeda. Dengan demikian, bentuk kolom air tidak terlalu mempengaruhi aspek resiko limpasan air yang dapat melewati *breakwater* bila diband-dingkan dengan pengaruhnya pada RAO dan efisiensi hidrodinamik. Penemuan ini sejalan dengan hasil Boccotti [4] melalui percobaan fisik.



Gambar 15. Variasi koefisien refleksi, C_r , terhadap frekuensi gelombang yang terjadi pada U-OWC dan L-OWC

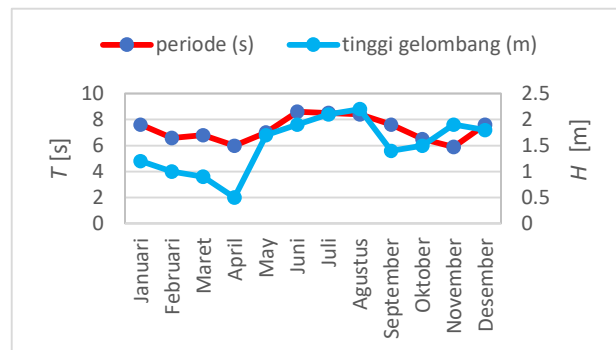
Interaksi antara gelombang datang ke struktur OWC juga menyebabkan munculnya gelombang tak linear dan variasi modulasi pada elevasi muka air eksternal. **Gambar 16** menunjukkan elevasi muka air eksternal di WG 1, 2, dan 3 yang berada di muka OWC ketika frekuensi gelombang sebesar $f=0,48$ Hz. Perubahan amplitudo elevasi muka air tersebut berbeda-beda bergantung pada bentuk kolom air internal dan frekuensinya.



Gambar 16. Elevasi muka air eksternal di berbagai lokasi WG yang berada di depan: (a) U-OWC dan (b) L-OWC

3.4. Studi kasus Perairan Belawan

Data parameter gelombang laut Belawan di ambil dari situs web Copernicus untuk mengevaluasi potensi OWC. Sebelumnya situs ini disebut sebagai *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES) dan merupakan komponen pengamatan Bumi dari program Antariksa Uni Eropa yang dikelola oleh Lembaga Eropa. Setelah memasukkan letak geografis Belawan yang berada pada titik longitude 98,694221E dan latitude 3,784303N, nilai periode dan tinggi gelombang selama tahun 2022 diperoleh dan ditampilkan pada **Gambar 17**.



Gambar 17. Nilai rata-rata periode dan tinggi gelombang Belawan

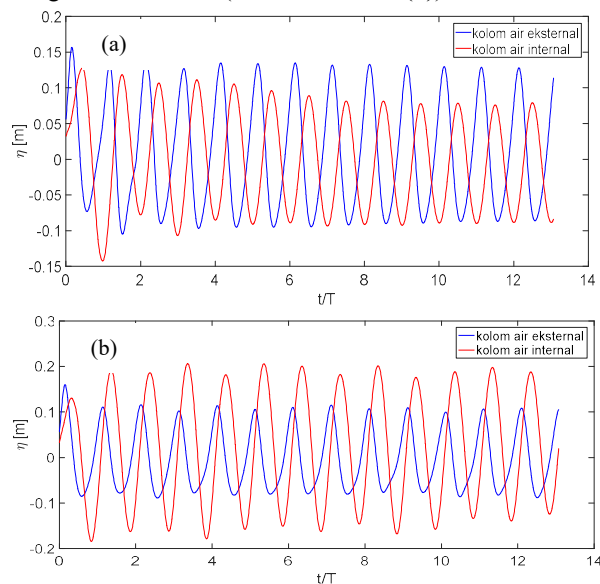
Dari hasil data di atas, parameter gelombang rata-rata di Belawan diperoleh sebagai berikut: (i) tinggi gelombang, H , sebesar 1,51 m, (ii) periode gelombang, T , adalah 7,26 s dan (iii) kedalaman perairan, h , di dekat lokasi pelabuhan sebesar 10 m. Dengan menetapkan skala sebesar $1:N_s$ dan mengikuti *Froude number scaling*, parameter gelombang untuk pemodelan OWC dapat dihitung dengan ketentuan bahwa kedalaman perairan pada model bernilai h/N_s , tinggi gelombang dan frekuensi gelombang yang dimodelkan masing-masing sebesar H/N_s dan $T/\sqrt{N_s}$. Dalam penelitian ini, N_s dipilih sebesar 10 sehingga parameter gelombang, yaitu $H=0,15$ m, $T=2,29$ s dan $f=0,44$ Hz, disimulasikan

dalam NWT dengan kedalaman $h = 1,0$ m. Sebelumnya kedalaman pada penelitian Vyzikas dkk. [3] ditetapkan sebesar 0,75 m. Untuk kondisi di perairan Belawan, dimensi U-OWC disesuaikan dengan faktor 1:0,75, sehingga dimensinya diperoleh dan ditampilkan pada **Tabel 6**. Hal yang sama juga berlaku untuk dimensi pada model L-OWC. Perbedaan di antara kedua model hanya terletak pada keberadaan kolom air eksternal pada U-OWC.

Tabel 6 Ukuran Geometri U-OWC Pada Kondisi Perairan Belawan dalam satuan meter

Or	0.020
Tw	0,032
$b1$	0.190
$b2$	0,380
$W1$	0.357
$W2$	0,381
$W3$	0,659
hd	1,00

Berdasarkan perhitungan komputasi pada U-OWC yang ditampilkan pada **Gambar 18(a)**, elevasi muka air pada kolom air internal dan eksternal menunjukkan adanya perbedaan fase sebesar 180° . Elevasi kolom air internal mencapai nilai puncak ketika elevasi dari kolom air eksternal berada di nilai terendah dan begitu pula sebaliknya. Untuk kasus pada L-OWC, perbedaan fase terlihat sebesar 90° dan dengan demikian mengindikasikan bahwa kolom air internal mengalami resonansi (lihat **Gambar 18(b)**).



Gambar 18. Grafik perbandingan elevasi kolom air internal dan eksternal pada (a) U-OWC dan (b) L-OWC

Hasil RAO dari kolom air internal untuk periode gelombang Belawan pada struktur U-OWC adalah sebesar 1,69 sedangkan pada struktur L-OWC, RAO bernilai 2,73. Dengan menggunakan kembali persamaan (11)-(14), efisiensi hidrodinamik, ϵ , pada kedua model OWC dihitung. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai ϵ pada U-OWC dan L-OWC masing-masing bernilai 10,8% dan 81,97%. Jelas sekali hal ini disebabkan karena U-OWC pada saat mengalami eksitasi gelombang pada frekuensi $f=0,44$ Hz ($T=2,29$ s) tidak berada dalam kondisi resonansi. Hal ini berbeda dengan kolom air pada L-OWC. Dengan membandingkan RAO pada L-OWC dengan nilai U-OWC dapat disimpulkan bahwa L-OWC lebih tepat diterapkan pada kondisi perairan Belawan. Tentu saja hal ini dapat berubah dengan memvariasikan ukuran dimensi draft dan lebar kolom airnya sekaligus juga ukuran PTO untuk memodifikasi draft efektif dari suatu OWC.

4. Simpulan

Simulasi *Numerical Wave Tank* (NWT) dengan menggunakan *waves2Foam* membuktikan bahwa perhitungan komputasi menghasilkan pendekatan yang akurat terhadap teoritis meskipun terdapat perbedaan amplitudo kurang dari 8%. Namun, nilai ini dianggap masih bisa ditoleransi karena besarnya tidak terlalu signifikan. Simulasi NWT dengan berbagai jenis *mesh* juga membuktikan bahwa semakin padat tingkat *mesh* yang digunakan, hasil prediksi elevasi muka air semakin konvergen.

Dalam penelitian ini, pemodelan U-OWC dan L-OWC di dalam NWT juga telah dilakukan. Hasilnya membuktikan bahwa model L-OWC memiliki kinerja yang baik bila dipandang dari segi RAO dan efisiensi hidrodinamiknya untuk semua frekuensi gelombang. Sementara itu, koefisien refleksi yang muncul dari kedua model tersebut menunjukkan tidak adanya perbedaan nilai yang terlalu signifikan. Terjadinya nilai maksimum dari RAO dan efektivitas hidrodinamik juga didukung oleh perbedaan fase yang terjadi antara elevasi muka air di dalam OWC dan di depan dinding/struktur OWC tersebut.

Dari percobaan simulasi struktur OWC yang telah dilakukan untuk kondisi perairan laut Belawan, didapatkan bahwa nilai RAO pada model L-OWC, yaitu 2,73, lebih besar daripada U-OWC yang bernilai 1,69. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur L-OWC lebih kompatibel untuk kondisi perairan Belawan. Hasil studi menunjukkan bahwa efisiensi hidrodinamis tertinggi pada L-OWC diperoleh ketika frekuensi gelombang sebesar 0,44 Hz dengan nilai efisiensi hidrodinamik sebesar 81,97%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Mwasilu and J. W. Jung, "Potential for Power Generation from Ocean Wave Renewable Energy source: A Comprehensive Review on State-of-the-art Technology and Future Prospects," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 13, 2019.
- [2] Heath, T. V, "A review of oscillating water columns," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 370, 2011.
- [3] T. Vyzikas, S. Deshoulières, M. Barton, O. Giroux, D. Greaves, and D. Simmonds, "Experimental investigation of different geometries of fixed oscillating water column devices," *Renew. Energy*, vol. 104, 2017.
- [4] P. Boccotti, "Comparison between a U-OWC and a conventional OWC," *Ocean Eng.*, vol. 34, 2007.
- [5] F. Arena, A. Romolo, G. Malara, V. Fiamma, and V. Laface, "Response of the U-OWC prototype installed in the civitavecchia harbour," *Proc. Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng. - OMAE*, vol. 10, 2018.
- [6] A. Kamath, H. Bihs, O. A. Arntsen, "Numerical investigations of the hydrodynamics of an oscillating water column device," *Ocean Engineering*, vol. 102, 2015.
- [7] A. Elhanafi, A. Fleming, G. Macfarlane, Z. Leong, "Numerical energy balance analysis for an onshore oscillating water column-wave energy converter," *Energy*, vol. 116, 2016.
- [8] E.P. Bangun, "Nonlinear forcing and motions of fixed cylindrical oscillating water columns," *Ocean Engineering*, vol. 296, 2024.
- [9] E.P. Bangun, "Radiated waves and rotational flows generated by cylindrical Oscillating Water Columns," *Applied Ocean Research*, vol. 142, 2024.
- [10] R. Eymard, E. Normale, and U. De Provence, *Finite Volume Methods*, vol. 7, no. Part 3, 2000.
- [11] N. G. Jacobsen, "waves2Foam Manual," *Research Gate*, 2017.
- [12] C. Hirt, B. Nichols, "Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries," *J. Comput. Phys.*, vol. 39, 1981.
- [13] R. Issa, "Solution of the implicit discretised fluid flow equations by operators splitting," *J. Comput. Phys.*, vol. 62, 1986.
- [14] J.H. Ferziger, M. Peric, "Computational Methods for Fluid Dynamics," *Springer, 3rd Ed.*, 2001.
- [15] R.G. Dean, R.A. Dalrymple, "Water wave mechanics for engineers and scientists," *World Scientific*, 1991.
- [16] N.G. Jacobsen, D.R. Fuhrman, J. Fredsoe, "A wave generation toolbox for the open-source cfd library: Openfoam," *Internat. J. Numer. Methods Fluids*, vol.70, 2012.
- [17] Bernard Le Méhauté. *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer, 1976.
- [18] Y. Zhou, D. Ning, L. Chen, G. Iglesias, "Nonlinear hydrodynamic modelling of an offshore stationary multi-oscillating water column platform," *Ocean Engineering*, vol. 227, 2021.