

## **Analisa Kinerja Perangkat Oscillating Water Column (OWC) dengan Pemodelan Sistem Mekanik Satu Derajat Kebebasan**

### ***Performance Analysis of Oscillating Water Column (OWC) Device with One Degree of Freedom Mechanical System Modeling***

**Jahirwan Ut Jasron**

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Sains dan Teknik Universitas Nusa Cendana  
Jl, Adisucipto Penfui, Kupang, NTT, Indonesia  
e-mail: [jahirwan.jasron@staf.undana.ac.id](mailto:jahirwan.jasron@staf.undana.ac.id)

#### **ABSTRAK**

Oscillating Water Column (OWC) adalah jenis perangkat yang telah banyak digunakan dalam konversi energi gelombang laut. Perangkat ini membangkitkan energi listrik dari naik turunnya air akibat gelombang laut yang masuk ke dalam ruang udara yang menyebabkan terjadinya kenaikan tekanan udara sehingga dapat menggerakkan turbin. Berbagai variable penelitian dan pemodelan serta analisa yang sudah dilakukan sampai pada pendekatan model sistem mekanis satu derajat kebebasan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kinerja perangkat dengan menganalisis pengaruh dari faktor karakteristik gelombang  $kh$  dan faktor rasio bukaan saluran masuk  $c/h$  dalam hubungannya dengan perubahan efisiensi penyerapan energi gelombang. Penelitian ini akan menggunakan metode eksperimen nyata dengan menguji model rancangan perangkat oscillating water column (OWC) yang merupakan validasi analisa numerik dengan pemodelan sistem mekanik satu derajat kebebasan yang diolah dengan bantuan software MATLAB Simulink. Eksperimen dilakukan dengan empat kedalaman air pada kanal terbuka, dan sembilan periode gelombang yang dibangkitkan oleh wave maker type piston. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan penyerapan energi gelombang sangat dipengaruhi oleh frekuensi gelombang dan frekuensi alamiah perangkat yang merupakan fungsi dari factor karakteristik gelombang serta besarnya gaya yang bekerja pada saluran masuk sebagai fungsi dari factor  $c/h$ .

**Kata Kunci:** OWC, energi gelombang, simulink.

#### **ABSTRACT**

*Oscillating Water Column (OWC) is a device widely used in ocean wave energy conversion. This device generates electrical energy from the rise and fall of water due to ocean waves entering the air space, which causes an increase in air pressure to drive a turbine. Various research and modelling variables and analyzes that were carried out have arrived at a mechanical system model approach of one degree of freedom. This study aims to obtain the device's performance by analyzing the effect of the  $kh$  wave characteristic factor and the  $c/h$  inlet opening ratio factor concerning changes in the absorption efficiency of wave energy. This study will use an actual experimental method by testing the design model of the oscillating water column (OWC) device, which is a validation of numerical analysis by modelling a mechanical system of one degree of freedom processed with the help of MATLAB Simulink software. Experiments were carried out with four water depths in an open channel and nine wave periods generated by a piston-type wavemaker. The results showed changes in wave energy absorption strongly influenced by the wave frequency and the natural frequency of the device, which is a function of the wave characteristic factor and the magnitude of the force acting on the inlet as a function of the  $c/h$  factor.*

**Keywords:** OWC, wave energy, simulink.

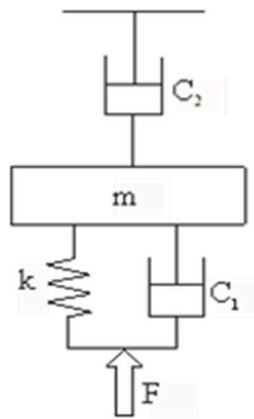
## PENDAHULUAN

OWC adalah konsep yang menarik untuk konversi energi gelombang laut karena pada tingkat praktis hanya memiliki beberapa komponen yang bergerak dan tidak ada bagian yang bergerak di dalam air. Perangkat ini dapat digunakan dalam berbagai bentuk kolom dan dapat ditempatkan di garis pantai, dekat pantai, atau mengambang di area lepas pantai. Efisiensi konversi OWC secara umum tergantung pada karakteristik gelombang laut dan parameter bentuk dari peralatan dan sistem saluran. Biaya energi yang dihasilkan dari gelombang adalah salah satu masalah utama yang dihadapi dalam pengembangan industri wave energy converter (WEC). Beberapa solusi telah diperkenalkan sejauh ini untuk mengatasi tantangan pengurangan biaya produksinya. Dalam hal ini, berbagai desain WEC mengupayakan peningkatan kinerja perangkat. Eksploitasi WEC di platform multiguna (misalnya mewujudkan konverter energi gelombang jenis OWC digabungkan dengan pemecah gelombang) bisa menjadi solusi yang tepat. Selanjutnya, produksi simultan dari energi dari berbagai sumber terbarukan di area yang sama (mis. penggabungan turbin angin terapung dengan konverter energi gelombang), juga dapat menyebabkan pengurangan biaya produksi energi. Beberapa jenis konverter energi gelombang berisi kolom tunggal yang tereksitasi oleh aksi gelombang yang datang yang menjadi energi kinetik dari mode osilasi ini akhirnya diubah menjadi listrik melalui unit power take-off (PTO). Perlu diperhatikan bahwa massa air tertutup di kolom perangkat Oscillating Water Column (OWC) bertindak sebagai sistem massa tunggal dan gerakan osilasi yang juga merupakan gerak massa ini akan mendorong udara menuju ke turbin.

Di antara berbagai jenis perangkat WEC yang telah dirancang, perangkat OWC adalah salah satu dari sedikit konsep yang berhasil dibangun dan dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik dari gelombang laut. Dalam beberapa penelitian, kinerja berbagai jenis perangkat OWC telah diselidiki secara luas untuk mengeksplorasi mekanisme produksi energi. Seperti, Lopez et al. menyelidiki pengaruh redaman turbin serta kondisi pasang surut dan karakteristik gelombang pada kinerja perangkat OWC. Falcao dan Henrique memperkenalkan tinjauan dan penyelidikan komprehensif tentang pengaruh geometri, hidrodinamik, termodinamika dan aerodinamis dalam pengujian model perangkat OWC. Falcao dkk. dan Sheng dkk. memperkenalkan pendekatan domain waktu nonlinier untuk mengevaluasi pengaruh sistem power take off nonlinier yang mempengaruhi karakteristik gerak dan kinerja perangkat konverter energi gelombang. Ning dkk. menyelidiki kinerja hidrodinamik dari perangkat energi gelombang OWC menggunakan HOBEM nonlinier.

Pada penelitian ini, perangkat konverter energi gelombang dimodelkan sebagai sistem osilasi satu derajat kebebasan untuk menentukan efisiensi model sehubungan dengan parameter yang umum digunakan dalam analisis getaran. Perlu dicatat bahwa dalam jenis umum dari konverter energi gelombang, daya gelombang datang pada awalnya diubah menjadi jenis daya mekanis, hidrolik atau pneumatik dan kemudian pada tingkat proses konversi energi berikutnya, daya yang dimanfaatkan akhirnya diubah menjadi listrik. Efisiensi utama perangkat adalah rasio daya yang

diserap dari gelombang dengan daya gelombang datang. Model dari konverter energi gelombang dianggap sebagai sistem getaran satu derajat kebebasan dan selanjutnya memperkirakan besarnya efisiensi perangkat. Sistem mekanik satu derajat kebebasan, dalam hal ini dianggap sebagai model sederhana dari konverter energi gelombang ditunjukkan pada Gambar. 1.



Gambar 1. Sistem mekanik satu derajat kebebasan sebagai model perangkat WEC

Parameter  $m$  mewakili massa kolom air yang berosilasi termasuk juga massa tambahan dan  $k$  adalah koefisien gaya pemulih linier, yang terutama berhubungan dengan gaya hidrostatis. Unit PTO perangkat diasumsikan bertindak linier terhadap gerakan perangkat yang diwakili oleh koefisien konstan  $C_1$ . Gaya dalam fungsi waktu yang bekerja pada perangkat WEC karena interaksi hidrodinamik diilustrasikan oleh parameter  $F$  yang memaksakan gerakan osilasi pada perangkat dalam arah sumbu  $y$ , sedangkan  $C_2$  sama dengan koefisien redaman PTO yang merupakan fungsi gaya yang berasal dari tekanan udara pada kolom udara. Contoh untuk sistem WEC satu derajat kebebasan dapat berupa perangkat OWC jenis konvensional. Persamaan gerak dinamis perangkat diturunkan dalam studi penelitian sebelumnya oleh Wang et al. [9,10]. Mereka memperkirakan suku-suku persamaan dinamik yang bersesuaian dengan memecahkan masalah hidrodinamika yang bersesuaian dengan menggunakan metode elemen hingga 3D.

Tujuan utama dari bagian studi ini adalah untuk mengeksplorasi secara analitis fenomena yang mungkin mengarah pada peningkatan kinerja (misalnya terjadi kondisi resonansi). Pendekatan model sistem mekanis satu derajat kebebasan ini diharapkan dapat mengungkap perubahan tekanan pada kolom udara sebagai parameter untuk menganalisis peningkatan kinerja perangkat OWC yang bersesuaian dengan hasil pengujian eksperimental.

## **METODOLOGI PENELITIAN**

### **Alat dan Bahan**

Adapun peralatan dan bahan yang digunakan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut :

- a. Kanal terbuka dengan dimensi 9000 x 500 x 600
- b. Wave maker model torak

- c. Perangkat OWC dengan dimensi 250 x 250 x 520
- d. Sensor Tekanan Udara
- e. Sensor Tinggi Gelombang
- f. Sensor Kecepatan Udara

### **Prosedur Penelitian**

#### **a. Simulasi Model Sistem Mekanik Satu Derajat Kebebasan**

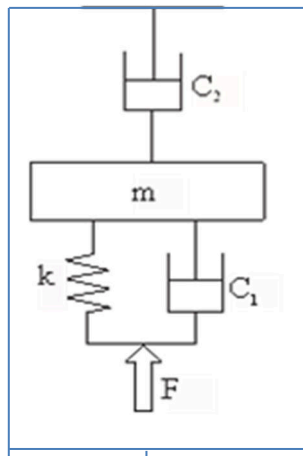
Model system mekanik satu derajat kebebasan disimulasi menggunakan software MATLAB Simulink. Model yang digunakan dianalogikan dengan pendekatan matematik seperti yang digambarkan pada gambar 2. Nilai yang paling sesuai untuk semua variabel diperoleh dengan melakukan perbandingan terhadap hasil eksperimen.

#### **b. Pengujian Perangkat OWC**

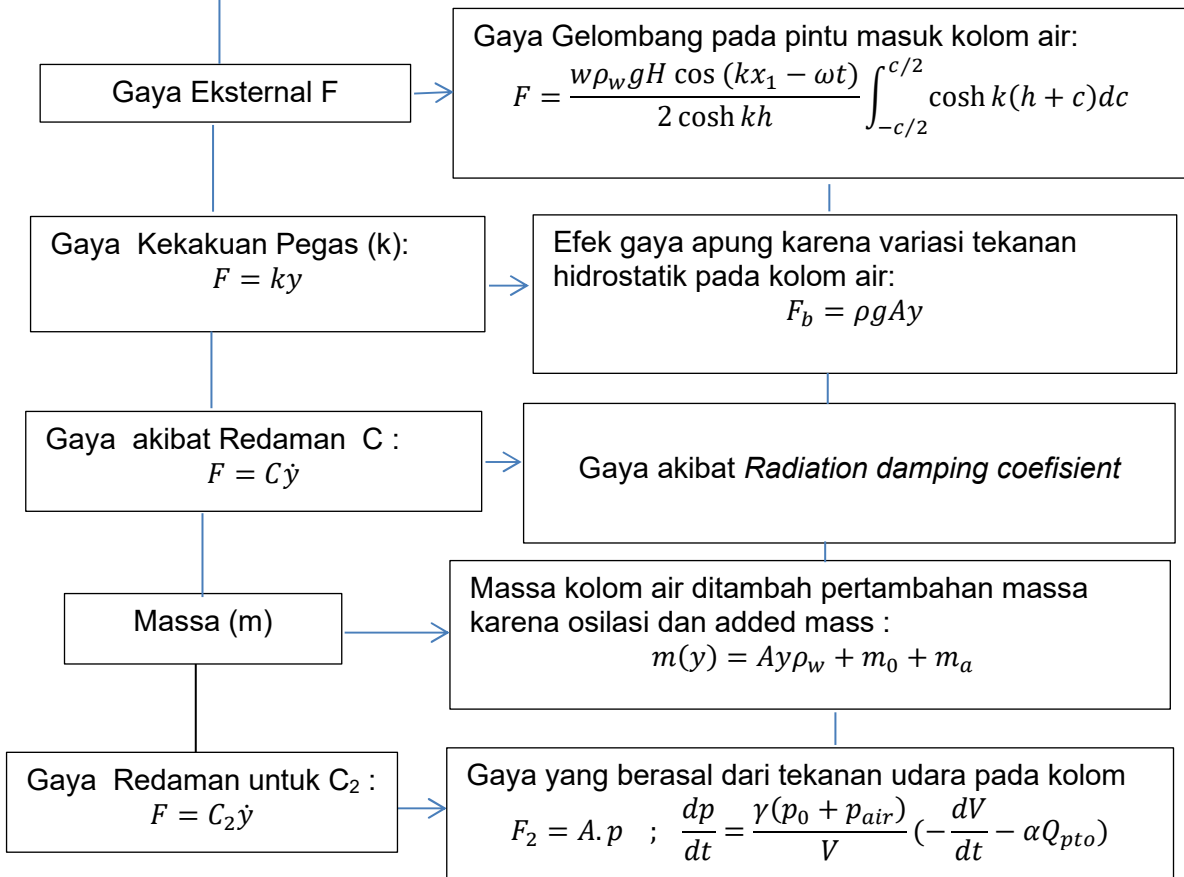
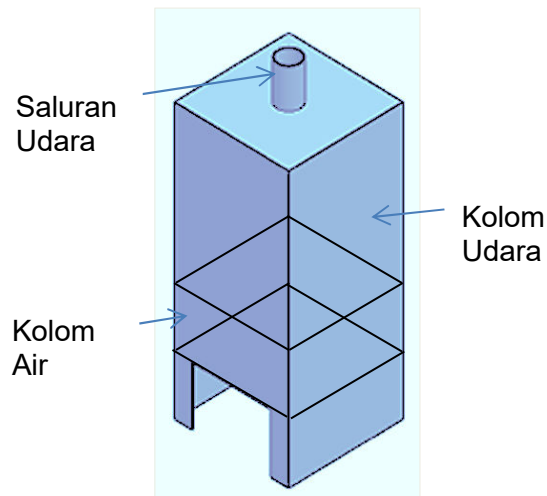
Pengujian dimulai dengan pemasangan alat uji yang dirangkai sesuai dengan fungsinya masing-masing. Semua alat uji yang terpasang harus sudah dipastikan telah berfungsi dengan baik. Untuk menghasilkan gelombang dengan amplitudo gelombang yang diinginkan atur kecepatan dan panjang langkah wave maker. Ukur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

Data hasil eksperimen ini di rekam pada tabel yang sudah disiapkan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik yang dibuat dengan fasilitas software Origin. Data hasil pengujian secara eksperimen merupakan validasi terhadap data hasil simulasi numerik.

Model Sistem Mekanik SDOF



Model Fisik OWC



Gambar 2. Skema analogi model sistem mekanik SDOF terhadap model fisik perangkat OWC

c. Efisiensi Perangkat OWC

Efisiensi perangkat OWC ditentukan berdasarkan perbandingan besar tenaga yang dihasilkan oleh gelombang pada bagian masuk perangkat ( $P_w$ ) terhadap besarnya tenaga yang diserap dari gelombang oleh perangkat OWC dimana tenaga yang dihasilkan gelombang ( $P_w$ ) dan yang diserap perangkat ( $P_{DCOWC}$ ) dinyatakan dengan persamaan:

$$P_{OWC} = \Delta P \cdot Q \text{ (watt)} \tag{1}$$

dimana :  $\Delta P = \left( \frac{\rho_a V_u^2}{2} \right)$

$$Q = V_u \left( \frac{\pi D^2}{4} \right), \text{ D = diameter saluran buang.}$$

Sedangkan  $P_w = \frac{\rho_w g^2}{32\pi} H^2 T \cdot w \text{ (watt)}$  (2)

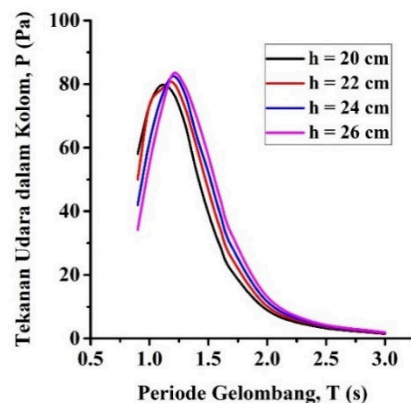
maka efisiensi perangkat DCOWC dinyatakan sebagai :

$$\eta_{DCOWC} = \frac{P_{DCOWC}}{P_w} \times 100\% \tag{3}$$

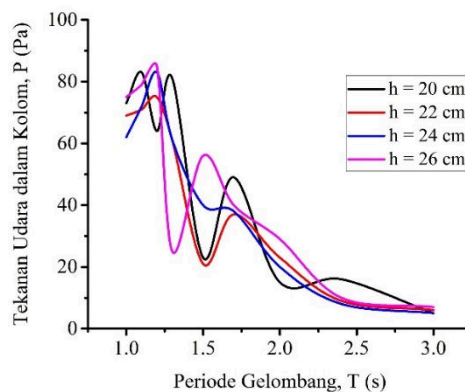
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### a. Perubahan Tekanan Udara

Perubahan tekanan udara dalam kolom diperoleh dari hasil simulasi pemodelan sistem mekanik satu derajat kebebasan yang dieksekusi dengan software Simulink. Pada simulasi ini nilai untuk mass added dan coefisien damping radiation dianggap tetap untuk semua variasi kedalaman air. Hasil eksekusi untuk semua kedalaman air dan periode gelombang ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan perubahan tekanan udara hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 4.



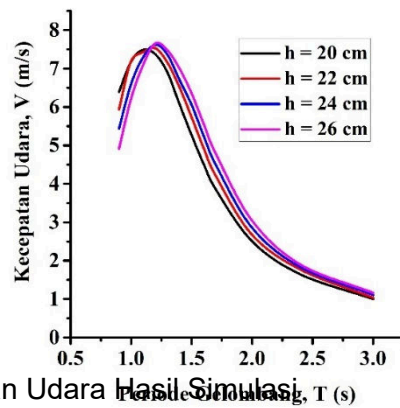
Gambar 3. Grafik perubahan tekanan udara hasil simulasi



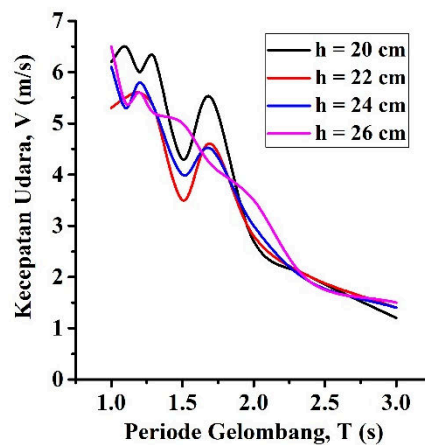
Gambar 4. Grafik perubahan tekanan udara hasil eksperimen

### b. Kecepatan Udara melalui Saluran Buang

Hasil simulasi perubahan kecepatan udara pada saluran buang sebagai akibat dari perubahan tekanan udara dalam kolom ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 6. Kecepatan udara yang dimaksud adalah kecepatan udara yang melalui penampang saluran buang yang berbentuk silindris yang diletakkan pada bagian atas kolom udara.



Gambar 5. Grafik Kecepatan Udara Hasil Simulasi



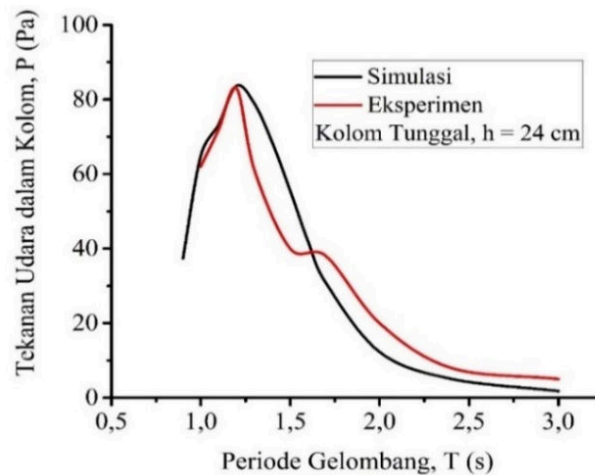
Gambar 6. Grafik Kecepatan Udara Hasil Eksperimen

**c. Perbandingan data hasil simulasi terhadap hasil eksperimen**

Perubahan tekanan udara yang dihasilkan pada proses simulasi kemudian divalidasi kesesuaiannya dengan perubahan tekanan udara pada perangkat OWC hasil eksperimen. Sebagai contoh validasi, pada Gambar 7. disajikan perbandingan kurva hasil simulasi dan eksperimen untuk kasus kedalaman air ( $h$ ) = 24 cm. Terlihat bahwa kecenderungan perubahan tekanan udara menunjukkan kesesuaian walaupun terjadi perbedaan nilai. Perbedaan nilai yang terjadi antara hasil simulasi dan eksperimen disebabkan oleh beberapa faktor yaitu:

1. Kemampuan sensor yang masih rendah dalam membaca perubahan tekanan udara maupun kecepatan udara sehingga terjadi noise atau gangguan terhadap sinyal yang harusnya diteruskan oleh sensor ke data logger.

2. Terjadinya gelombang balik pada perangkat uji yang menyebabkan ketidakstabilan karakteristik gelombang untuk rentang waktu pengambilan data.



Gambar 7. Perbandingan hasil simulasi dan eksperimen untuk tekanan udara dalam kolom

Pada perbandingan nilai simulasi dan eksperimen ini, untuk masing-masing kedalaman air ( $h$ ), nilai mass added ( $m_a$ ) dan koefisien redaman radiasi ( $C$ ) diperoleh berdasarkan nilai maksimum tekanan udara dalam kolom hasil eksperimen seperti yang ditampilkan pada Tabel 1. Nilai pada tabel ini kemudian dijadikan acuan untuk melakukan analisis pengaruh penambahan kolom air terhadap perubahan tekanan udara dalam kolom pada perangkat OWC dan selanjutnya menjadi parameter untuk analisis kinerja perangkat.

Tabel 1. Mass added dan koefisien redaman radiasi untuk simulasi model OWC

Kedalaman air (h) (cm)	$m_a$ (kg)	$C$ (N s/m)
20	15,57	37,66
22	15,29	38,19
24	15,29	38,46
26	15,57	37,66
<b>Rata-rata</b>	<b>15,43</b>	<b>37,99</b>

Sumber: Data asli yang diolah

#### d. Analisis Kinerja Perangkat OWC dengan Model Sistem Mekanik Satu Derajat Kebebasan

Kinerja perangkat OWC adalah kemampuan perangkat untuk menyerap energi gelombang sehingga terjadi osilasi permukaan kolom air yang menyebabkan perubahan tekanan udara di dalam kolom dan berakibat terjadinya perubahan kecepatan udara keluar saluran buang udara. Kinerja OWC dihitung berdasarkan persamaan 3. yaitu perbandingan besar tenaga yang dihasilkan oleh

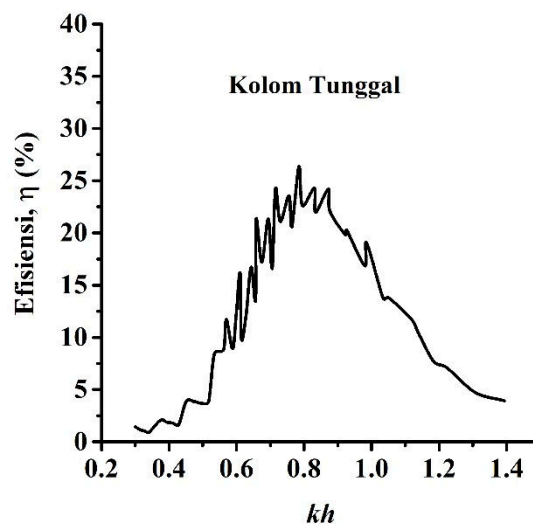


gelombang pada bagian masuk perangkat ( $P_w$ ) terhadap besarnya energi yang diserap dari gelombang oleh perangkat OWC ( $P_{owc}$ ).

Untuk mendapatkan gambaran yang berlaku umum terhadap perubahan efisiensi perangkat maka akan dibahas faktor-faktor yang mempengaruhinya dalam bentuk faktor non dimensional karakteristik gelombang  $kh$  dan ratio luas bukaan saluran masuk terhadap kedalaman air ( $c/h$ ).

### 1. Pengaruh faktor karakteristik gelombang $kh$ terhadap perubahan efisiensi perangkat

Pada Gambar 8. dapat dilihat bahwa penyerapan energi gelombang oleh perangkat OWC yang terbaik terjadi pada rentang  $kh$  0,7-0,9 dengan efisiensi berkisar antara 23 sampai 25 %. Hal ini menjelaskan bahwa faktor karakteristik gelombang memegang peranan penting untuk proses penyerapan energi gelombang. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh Sundar dkk., diungkapkan bahwa penyerapan maksimum energi gelombang terjadi pada  $h/L$  sekitar 0,131 atau  $kh = 0,8$ . Penyerapan energi maksimum terjadi sangat erat hubungannya dengan perubahan massa kolom air sebagai fungsi dari kedalaman air dimana massa kolom air merupakan penentu utama perubahan frekuensi alamiah dari perangkat OWC. Perubahan frekuensi alamiah perangkat selanjutnya akan menentukan peristiwa resonansi yaitu Ketika frekuensi alamiah perangkat mempunyai nilai yang sama dengan frekuensi gelombang yang masuk kedalam perangkat. Peristiwa resonansi inilah yang memicu osilasi kolom air menjadi semakin besar sehingga efisiensi perangkat akan menjadi semakin besar.

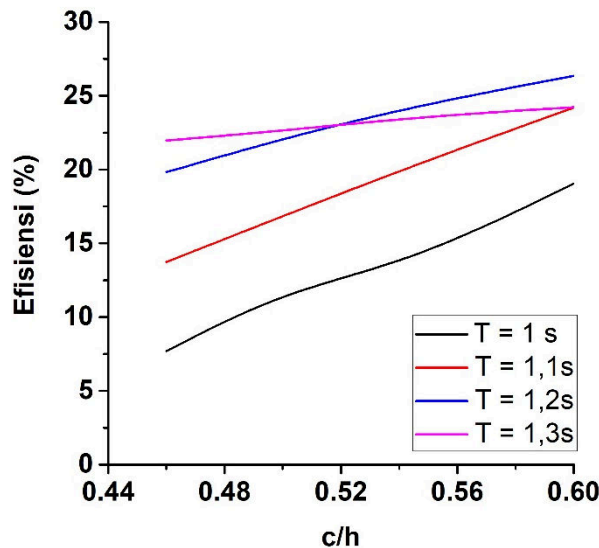


Gambar 8. Faktor  $kh$  terhadap perubahan efisiensi perangkat OWC

### 2. Pengaruh faktor $c/h$ terhadap perubahan efisiensi perangkat

Gambar 9 menunjukkan bahwa pola perubahan penyerapan daya oleh perangkat OWC. Grafik tersebut mengindikasikan kemampuan perangkat dalam menyerap gaya hidrostatis yang bekerja pada saluran masuk kolom. Secara teoritis dapat dijelaskan bahwa semakin besar saluran masuk dan semakin besar kedalaman air maka semakin besar gaya yang terjadi. Karena

itu peran besar rasio bukaan saluran masuk ( $c/h$ ) menjadi sangat penting karena ternyata bahwa semakin besar ratio  $c/h$  maka kemampuan perangkat untuk menyerap daya gelombang semakin besar pula.



Gambar 9. Faktor  $c/h$  terhadap perubahan efisiensi perangkat OWC

Selanjutnya dapat dilihat bahwa penyerapan energi terbesar terjadi pada periode gelombang ( $T$ ) 1,2 s dengan efisiensi penyerapan sebesar 26,35 %. Dean dkk. dalam bukunya tentang mekanika gelombang air menjelaskan bahwa gaya yang bekerja pada struktur sangat ditentukan oleh tekanan dinamis disekitarnya. seperti yang diekspresikan pada persamaan 4.

$$p(x, z, t) = \frac{\rho g H \cosh k(h+z)}{2 \cosh kh} \cos(kx - \omega t) \tag{4}$$

Persamaan 4. menunjukkan bahwa tidak ada variasi tekanan dinamis dalam arah  $y$ . Hal ini menjelaskan bahwa tekanan dinamis hanya ditentukan oleh tinggi dan panjang gelombang saja. Untuk luasan tertentu saluran masuk kolom air perangkat OWC, gaya tekan total pada saluran masuk ( $F$ ) dinyatakan sebagai persamaan 5.

$$F = \frac{w \rho_w g H \cos(kx - \omega t)}{2 \cosh kh} \int_{-c/2}^{c/2} \cosh k(h+c) dc \tag{5}$$

dimana  $w$  dan  $c$  adalah lebar dan tinggi saluran masuk sedangkan  $x$  adalah lokasi gaya tekan. Dari persamaan di atas terlihat dengan jelas bahwa rasio bukaan saluran ( $c/h$ ) akan sangat mempengaruhi besarnya gaya tekan yang bekerja pada saluran masuk. Selain itu perlu juga dicermati bahwa karena gaya tekan tersebut bekerja menurut panjang kolom maka posisi titik kerja gaya tekan juga turut mempengaruhi besarnya gaya tekan tersebut.

## KESIMPULAN

Perubahan kinerja perangkat OWC yang dianalisis berdasarkan model system mekanik satu derajat kebebasan menunjukkan bahwa penyerapan energi maksimum terjadi sangat erat

## SEMINAR NASIONAL SAINS DAN TEKNIK FST UNDANA (SAINSTEK)

Kupang, 02 November 2021

hubungannya dengan perubahan massa kolom air sebagai fungsi dari kedalaman air dimana massa kolom air merupakan penentu utama perubahan frekuensi alamiah dari perangkat OWC. Selanjutnya diperoleh bahwa penyerapan energi terbesar terjadi pada periode gelombang (T) 1,2 s dengan efisiensi penyerapan sebesar 26,35 %. Kondisi ini berkaitan langsung dengan rasio bukaan saluran ( $c/h$ ) yang sangat mempengaruhi besarnya gaya tekan yang bekerja pada saluran masuk perangkat OWC.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ning D.Z., Wang, R.Q., Zou, Q.P., & Teng, B., 2016, An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC wave energy converter. *Applied Energy* 168 : 636 - 648.
- Ning D., Wang R., Chen L., & Sun K., 2019, Experimental investigation of a land-based dual-chamber OWC wave energy converter, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 105 (1): 48–60.
- Sheng, W., Alcom, R., & Lewis, A., 2013, On thermodynamics on primary power conversion of oscillating water column wave energy converters, *Journal Of Renewable and sustainable Energy*, 5, 023105.
- Falcao Antonio, F.O., & Henriques Joao C.C., 2016, Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review, *Renewable Energy*, 85 : 1391-14
- Lopez, I., Castro, A., & Iglesias, G., 2015, Hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter by means of particle imaging velocimetry, *Energy* 83 : 89 – 103.
- Lopez, E. M. , Ferrando A. M. , Gilabert, M. C. , del Pino, C., & Rodríguez, M. L., 2016, Note on a real gas model for OWC performance, *Renewable Energy*, 85 : 588-597.
- E. G. Bautista, F. Méndez, and O. Bautista, "Numerical Predictions of the Generated Work in an Air-Compression Chamber Driven by an Oscillating Water Column," pp. 7–16, 2009.
- J. R. Nader, S. P. Zhu, and P. Cooper, "Hydrodynamic and energetic properties of a finite array of fixed oscillating water column wave energy converters," *Ocean Eng.*, vol. 88, pp. 131–148, 2014.
- D. Z. Ning, R. Q. Wang, Q. P. Zou, and B. Teng, "An experimental investigation of hydrodynamics of a fixed OWC Wave Energy Converter," *Appl. Energy*, vol. 168, pp. 636–648, 2016.
- S. John Ashlin, V. Sundar, and S. A. Sannasiraj, "Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristics," *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 341–353, 2016.
- Robert G. Dean, & Robert A. Dalrymple, , 1986, *Water Wave Mechanics For Engineers and Scientists*, World Scientific.
- Sundar, V. & Sannasiraj, S.A., 2014, Wave Power Absorption Capability of a Multi Resonant Double Chamber Oscillating Water Column Device, *Jurnal Teknologi*.
- Berchmans, L. J., R. Sindhu, S. Angappan, & C.O. Augustin. 2008. Effect of antimony substitution on structural and electrical properties of  $\text{LaFeO}_3$ . *Journal of Materials Processing Technology*. 207: 301–306.