

Analisis Perbandingan Mekanisme Pembuat Gelombang Buatan Menggunakan Piston Datar dan Piston Lengkung pada Sistem Pneumatik Simulator Kapal Laut

Faishal Erfian Nurhadi¹, Agus Riyanto^{2*}.

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik gelombang yang dihasilkan oleh sistem pembangkit gelombang mekanis menggunakan aktuator pneumatik dengan dua variasi bentuk piston, yaitu piston datar dan piston lengkung. Pengujian dilakukan dalam skala laboratorium dengan tiga variasi waktu aktuasi: 400 ms - 200 ms, 300 ms - 300 ms, dan 300 ms - 150 ms. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk piston mempengaruhi parameter gelombang, seperti tinggi gelombang, energi, dan daya. Piston datar menghasilkan gelombang dengan tinggi rata-rata 0,0993 m dan energi 12,208 J/m, namun dengan kestabilan yang lebih rendah ($CV = 10,16\%$). Sebaliknya, piston lengkung menghasilkan gelombang dengan tinggi lebih rendah (0,0677 m) tetapi menunjukkan kestabilan yang lebih baik dengan nilai CV sebesar 9,8%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa piston datar lebih efektif dalam menghasilkan amplitudo dan energi gelombang yang tinggi, sedangkan piston lengkung lebih stabil secara statistik. Sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk aplikasi simulasi gelombang dengan meningkatkan kontrol tekanan otomatis.

Kata Kunci; gelombang buatan, mekanisme pneumatik, piston datar, piston lengkung, karakteristik gelombang, stabilitas gelombang.

1. PENDAHULUAN

Lautan mencakup sekitar 71% dari permukaan Bumi dan memainkan peran krusial dalam berbagai aspek kehidupan manusia, mulai dari transportasi hingga eksplorasi sumber daya alam. Aktivitas maritim yang berlangsung di lautan seringkali terpengaruh oleh gelombang dan arus laut yang dapat mengganggu kelancaran operasi, terutama pada kegiatan eksplorasi minyak lepas pantai, transportasi kapal, dan pengujian struktur apung. Oleh karena itu, penting untuk memiliki sistem yang dapat memprediksi dan mensimulasikan kondisi gelombang laut dalam skala laboratorium guna menguji peralatan atau struktur sebelum diterapkan di laut.

Gelombang laut dihasilkan oleh berbagai faktor eksternal, seperti angin, aktivitas tektonik, dan perubahan tekanan atmosfer. Karakteristik gelombang yang terdiri dari tinggi, panjang, periode, dan energi memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas struktur apung dan performa kapal. Simulasi gelombang buatan diperlukan untuk memahami interaksi objek dengan gelombang tersebut dalam kondisi yang terkendali. Sistem pembangkit gelombang buatan, baik itu menggunakan mekanisme hidrolik, pneumatik, maupun mekanik, telah banyak digunakan dalam penelitian dan pengembangan teknik maritim.

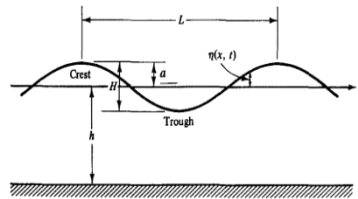
Penelitian ini difokuskan pada sistem pembangkit gelombang mekanis menggunakan aktuator pneumatik. Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah piston, yang bentuknya diyakini dapat mempengaruhi karakteristik gelombang yang dihasilkan. Piston datar dan piston lengkung adalah dua bentuk piston yang umum digunakan dalam sistem pneumatik. Perbedaan bentuk geometri piston ini dapat berpengaruh pada tinggi gelombang, panjang gelombang, energi, daya, dan kestabilan gelombang yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan pengaruh bentuk piston datar dan piston lengkung terhadap karakteristik gelombang yang dihasilkan dalam sistem pneumatik.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Gelombang laut adalah fenomena osilasi energi yang bergerak melalui medium air. Gelombang ini sangat penting dalam berbagai aplikasi rekayasa maritim, terutama untuk desain struktur lepas pantai dan kapal. Gelombang dapat diklasifikasikan berdasarkan kedalamannya menjadi tiga kategori utama: gelombang dalam, gelombang transisi, dan gelombang dangkal. Gelombang dalam tidak terpengaruh oleh dasar laut, sementara

* Corresponding author: agus.riyanto@univpancasila.ac.id

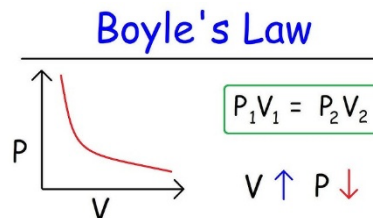
gelombang dangkal sangat dipengaruhi oleh kedalaman perairan. Gelombang transisi merupakan peralihan antara kedua jenis gelombang tersebut.



Gambar 1 Karakteristik Gelombang

Seperti pada “Gambar 1” gelombang memiliki karakteristik seperti tinggi gelombang, panjang gelombang, periode, dan kecepatan gelombang dipengaruhi oleh berbagai faktor eksternal, termasuk angin, kedalaman air, dan topografi dasar laut. Kecepatan gelombang di perairan dalam hanya dipengaruhi oleh panjang gelombang, sedangkan di perairan dangkal, kecepatan gelombang tergantung pada kedalaman air. Oleh karena itu, pemahaman tentang teori gelombang sangat penting dalam merancang dan mensimulasikan gelombang untuk pengujian struktur maritim.

Hukum Boyle menyatakan bahwa, pada suhu konstan, volume suatu gas berbanding terbalik dengan tekanan yang diberikan pada gas tersebut.

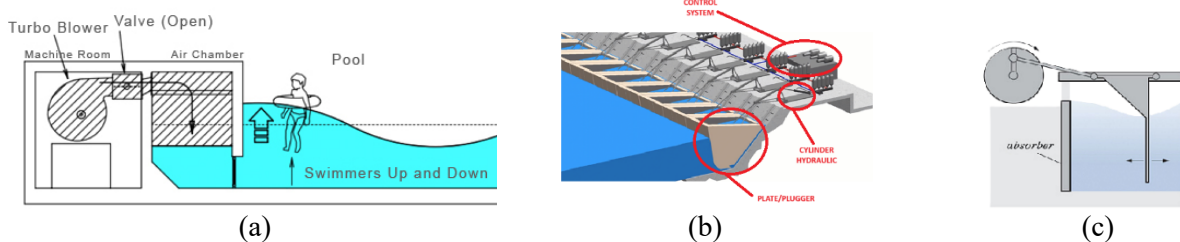


Gambar 2 Hukum Boyle

Pada sistem pembangkit gelombang pneumatik “Gambar 2” tekanan udara yang diterapkan pada piston mempengaruhi perubahan volume udara dalam ruang pembangkit, yang selanjutnya mempengaruhi tinggi dan kestabilan gelombang yang dihasilkan.

a. Teori Gelombang Buatan

Gelombang buatan dihasilkan dengan menggunakan alat yang dapat mensimulasikan kondisi gelombang laut. Gelombang buatan digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pengujian kapal, struktur apung, dan sistem energi terbarukan berbasis laut. Berbagai jenis mekanisme telah digunakan untuk menghasilkan gelombang buatan, termasuk mekanisme pneumatik, hidrolik, dan mekanis seperti pada “Gambar 3”.



Gambar 3 Mekanisme Pneumatik (a), Mekanisme Hidrolik (b), Mekanisme Mekanis (c)

Gelombang buatan dapat dikendalikan dengan mengubah parameter sistem seperti kecepatan piston, stroke, dan frekuensi. Piston yang digunakan dalam sistem ini dapat berbentuk datar atau lengkung, masing-masing menghasilkan gelombang dengan karakteristik yang berbeda. Pada umumnya, piston datar cenderung menghasilkan gelombang dengan amplitudo yang lebih besar, namun kestabilannya lebih rendah. Piston lengkung, di sisi lain, menghasilkan gelombang dengan amplitudo yang lebih kecil namun lebih stabil.

b. Mekanisme Pneumatik dalam Pembuatan Gelombang

Mekanisme pneumatik pada pembangkit gelombang bekerja dengan memanfaatkan tekanan udara untuk menggerakkan piston dalam silinder. Piston ini bergerak secara translasi untuk menggeser air dan menghasilkan gelombang. Keuntungan dari sistem pneumatik adalah kontrol yang lebih mudah, respons cepat, dan potensi untuk menghasilkan gelombang dalam berbagai parameter dengan presisi tinggi. Mekanisme ini

juga lebih efisien dalam hal energi dibandingkan dengan sistem hidrolik yang memerlukan fluida tekanan tinggi.

Geometri piston yang digunakan dalam sistem pneumatik dapat mempengaruhi karakteristik gelombang yang dihasilkan. Secara umum, terdapat dua bentuk piston yang digunakan dalam sistem ini, yaitu piston datar dan piston lengkung.



Gambar 4 Piston datar (a), Piston Lengkung (b)

Pada “Gambar 4” bentuk geometri piston, piston datar menghasilkan gelombang dengan amplitudo yang lebih besar, namun gelombang yang dihasilkan memiliki kestabilan yang lebih rendah. Hal ini karena gerakan translasi piston yang mendatar lebih cenderung menyebabkan gangguan pada permukaan air yang lebih besar. Sedangkan Piston lengkung menghasilkan gelombang yang lebih stabil, meskipun dengan amplitudo yang lebih kecil. Bentuk lengkung pada piston dapat membantu mendistribusikan energi lebih merata ke seluruh permukaan air, sehingga menghasilkan gelombang yang lebih terkontrol.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan desain deskriptif komparatif, yang bertujuan untuk membandingkan kinerja dua bentuk piston (datar dan lengkung) dalam menghasilkan gelombang buatan dengan sistem pneumatik. Dalam eksperimen ini, parameter gelombang seperti tinggi gelombang, panjang gelombang, periode, kecepatan rambat, energi, dan daya dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas dan kestabilan masing-masing bentuk piston.

a. Alat dan Bahan

Tabel 1 Alat dan bahan

No.	Komponen	Fungsi	Spesifikasi
1	Kompresor Udara	Menghasilkan udara bertekanan untuk mendorong air	Tekanan kerja: 100 - 500 kPa Kapasitas: 0,6 - 1,2 m ³ /jam
2	Katup Solenoid	Mengontrol pelepasan udara dari kompresor ke ruang udara	Tekanan kerja: 0 - 500 kPa Frekuensi buka-tutup: 0,5 - 1 Hz Tegangan: 12V atau 24V DC
3	Ruang Udara (<i>Chamber</i>)	Menampung dan melepaskan udara bertekanan untuk menciptakan gelombang	Volume: 0,05 - 0,06 m ³
4	Pipa/Selang Udara	Menyalurkan udara dari kompresor ke ruang udara	Diameter dalam: 6 - 8 mm Tahan tekanan hingga 1000 kPa
5	Regulator Tekanan	Mengatur tekanan udara dari kompresor ke sistem	Tekanan kerja: 0 - 500 kPa
6	Kontrol Mikro (<i>Arduino</i> atau <i>Timer</i>)	Mengatur waktu buka-tutup katup sesuai periode gelombang	Dapat diprogram untuk frekuensi 0,5 - 1 Hz Tegangan: 5V atau 12V
7	Kolam Prototipe	Wadah untuk menguji sistem gelombang buatan	Ukuran: 1 x 0,5 x 0,3 m (panjang x lebar x kedalaman)
8	Pengukur Tekanan (Manometer)	Memeriksa tekanan udara di dalam sistem	Rentang: 0 - 800 kPa Akurasi: ± 100 kPa
9	<i>Power Supply</i>	Sumber listrik untuk kompresor, katup, dan kontrol mikro	Tegangan: 12V atau 24V DC
10	<i>Valve Controller (Relay/Driver)</i>	Mengontrol katup dari kontrol mikro	Tegangan: 12V atau 24V DC
11	<i>Piston datar dan lengkung</i>	Menekan permukaan air dalam chamber	
12	<i>Silinder pneumatik</i>	Menggerakkan piston di dalam chamber	Jenis Silinder : Double Acting

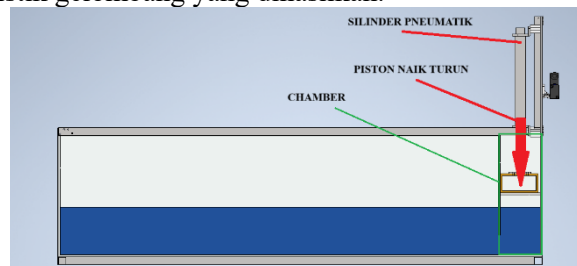
No.	Komponen	Fungsi	Spesifikasi
			Diameter Piston : 20 mm (0,02 m) Langkah (Stroke) : 150 mm (0,15 m) Tekanan Maksimal : 100.000 Pa

Pada "Tabel 1" merinci berbagai alat dan bahan yang digunakan dalam percobaan, termasuk spesifikasi teknis dan fungsinya dalam sistem pembangkit gelombang pneumatik. Pemilihan alat dan bahan yang tepat sangat penting untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil eksperimen, terutama dalam hal pengontrolan tekanan udara dan gerakan piston

b. Desain Penelitian.

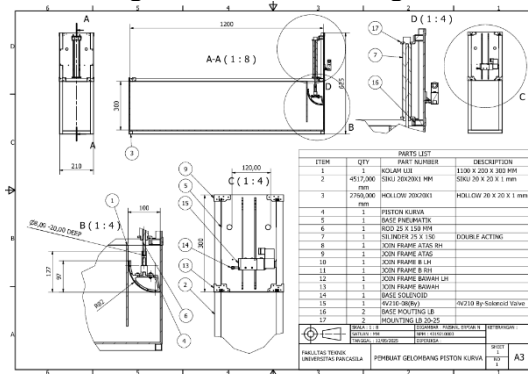
1) Perancangan alat

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi bentuk piston (datar dan lengkung) dalam menghasilkan gelombang pada sistem pneumatik. Percobaan dilakukan dengan menggunakan dua bentuk piston berbeda, yaitu piston datar dan piston lengkung, serta tiga variasi waktu aktuasi untuk mempengaruhi karakteristik gelombang yang dihasilkan.



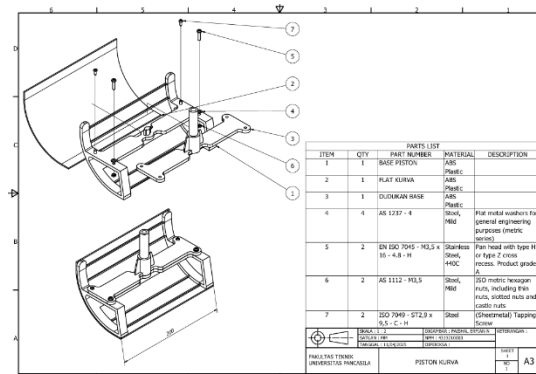
Gambar 5 Konsep Mekanisme

Piston bergerak pada arah vertikal, seperti pada "Gambar 5" piston digerakkan oleh silinder pneumatik pada tekanan 150 kPa dengan arah vertikal. Dengan waktu aktuasi yang berbeda.



Gambar 6 Desain mekanisme pembuat gelombang

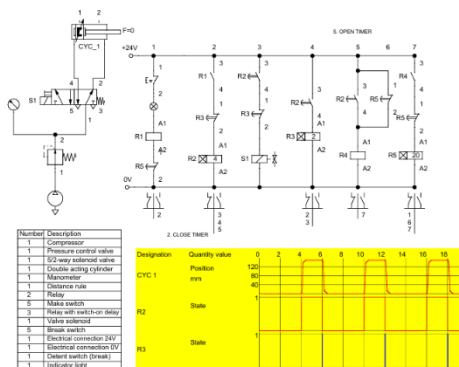
Pada "Gambar 6" disajikan representasi sistem secara keseluruhan, yang mengintegrasikan alat dan bahan yang telah dijelaskan sebelumnya. Dalam sistem ini, komponen-komponen seperti kompresor udara, katup solenoid, silinder pneumatik, dan piston bekerja secara sinergis untuk menghasilkan gelombang buatan. Kompresor udara menyediakan tekanan untuk menggerakkan silinder pneumatik, yang kemudian menggerakkan piston secara vertikal. Piston ini, dapat berupa piston datar atau piston lengkung dan dapat memengaruhi karakteristik gelombang yang dihasilkan, sementara katup solenoid mengatur aliran udara dengan waktu aktuasi yang bervariasi untuk mengontrol tinggi dan kestabilan gelombang. Sistem ini dirancang untuk mensimulasikan kondisi gelombang laut dalam skala laboratorium.



Gambar 7 Desain Penghubung Piston

Pada "Gambar 7" menunjukkan desain penghubung piston pada sistem pneumatik. Komponen penghubung ini berfungsi untuk menghubungkan piston dengan silinder pneumatik, memungkinkan gerakan vertikal piston yang diperlukan untuk menghasilkan gelombang. Desain penghubung ini memastikan transmisi gaya yang efisien dari silinder ke piston, serta mendukung kestabilan dan ketepatan gerakan piston dalam proses pembangkitan gelombang.

2) *Sistem pneumatic*

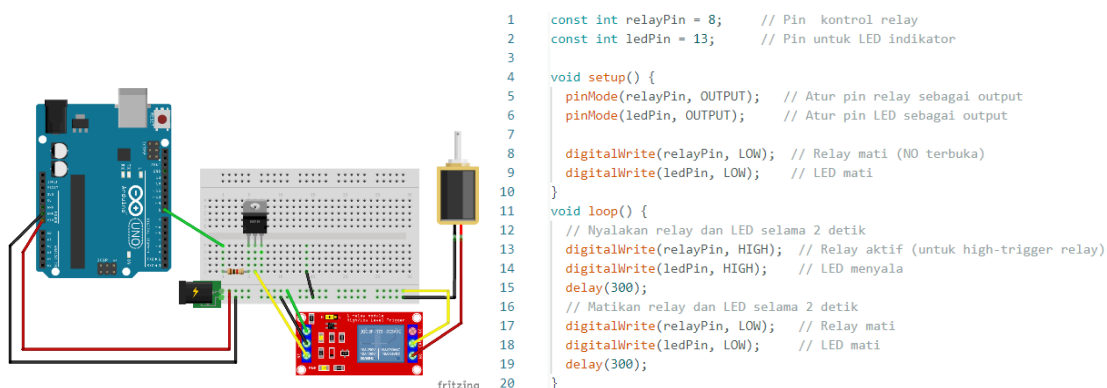


Gambar 8 Rangkaian sistem pneumatik

Pada "Gambar 8" menunjukkan rangkaian sistem pneumatik secara keseluruhan bagaimana komponen-komponen utama, seperti kompresor udara, katup solenoid, silinder pneumatik, dan piston, saling terhubung dan bekerja bersama dalam menghasilkan gelombang buana. Sistem ini dirancang untuk mengontrol aliran udara dan tekanan secara tepat, dengan menggunakan waktu aktuasi yang berbeda untuk mengatur gerakan piston dan karakteristik gelombang yang dihasilkan.

Silinder pneumatik beroperasi sesuai dengan waktu aktuasi yang di tentukan aktuasi 1 aktif 400 ms – mati 200 ms, aktuasi 2 300 ms - 300 ms dan aktuasi 3 300 ms - 150 ms. Dengan tekanan di jaga pada 150 kPa.

3) Sistem Elektronik



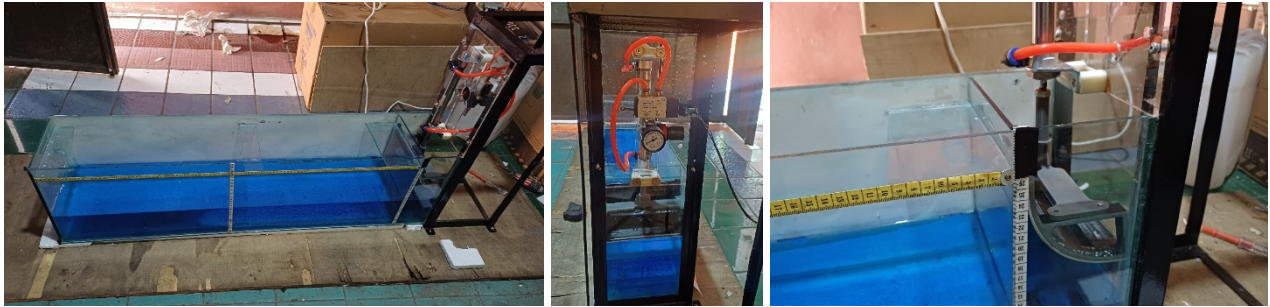
Gambar 9 Sistem elektronik (*Controller*)

Pada "Gambar 9" menunjukkan sistem elektronik yang berfungsi sebagai pengendali utama dalam mekanisme pembangkit gelombang pneumatik. Sistem ini mengatur operasi katup solenoid dengan cara

mengatur waktu buka-tutup katup, sesuai dengan waktu aktuasi yang telah ditentukan. Pengontrol elektronik ini memastikan pengendalian yang presisi terhadap aliran udara, sehingga dapat menghasilkan gelombang dengan karakteristik yang diinginkan, seperti kestabilan dan amplitudo yang sesuai

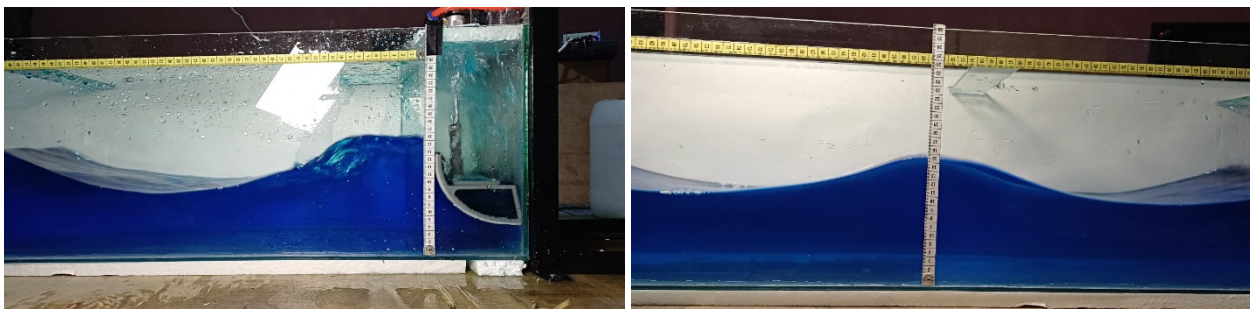
Sistem elektronik ini merupakan pengendali dari silinder pneumatik, dengan mengatur buka dan tutup katup solenoid supaya dapat beroperasi sesuai dengan waktu aktuasi yang ditentukan.

4) Hasil Perakitan dan uji coba



Gambar 10 Hasil perakitan mekanisme pembuat gelombang

Hasil perakitan mekanisme pembangkit gelombang pneumatik yang telah selesai. “Gambar 10” memperlihatkan seluruh sistem yang telah terpasang, termasuk komponen utama seperti silinder pneumatik, piston, dan penghubung, yang semuanya bekerja bersama untuk menghasilkan gelombang buatan. Perakitan ini mencerminkan susunan komponen yang telah dirancang untuk mendukung pengujian gelombang dengan berbagai variasi waktu aktuasi.



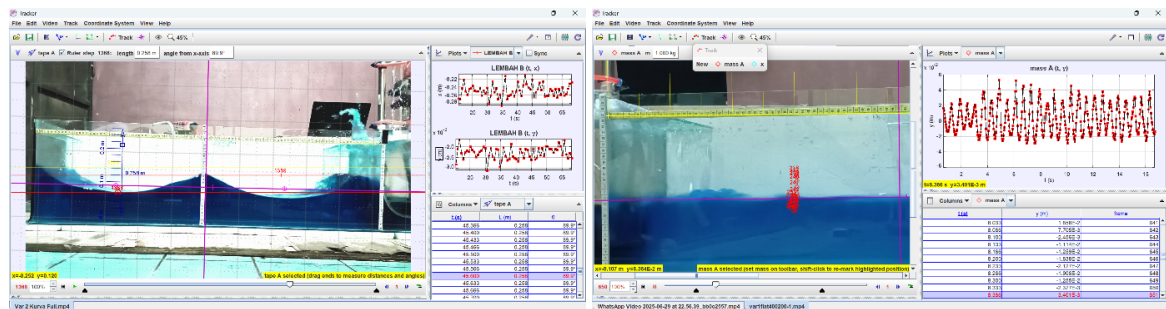
Gambar 11 Uji coba

Proses uji coba mekanisme pembangkit gelombang pneumatik yang telah dipasang. Pada “Gambar 11” memperlihatkan pengoperasian sistem dalam kondisi nyata, di mana piston bergerak sesuai dengan waktu aktuasi yang telah ditentukan, menghasilkan gelombang yang akan diuji dan dianalisis.

c. Teknik Pengumpulan Data

Data gelombang yang dihasilkan oleh sistem pneumatik direkam menggunakan kamera digital dengan kecepatan 30 fps. Rekaman video ini kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak Tracker seperti pada “Gambar 12” untuk mengukur parameter gelombang berikut:

- Tinggi Gelombang (H): Diukur dari puncak ke lembah gelombang.
- Panjang Gelombang (λ): Jarak antara dua puncak gelombang berturut-turut.
- Periode (T): Waktu yang dibutuhkan untuk satu siklus gelombang.
- Kecepatan Gelombang (C): Kecepatan perambatan gelombang di permukaan air.
- Energi Gelombang per Satuan Panjang (E): Energi yang dibawa oleh gelombang per satuan panjang.
- Daya Gelombang per Satuan Panjang (P): Daya yang dihantarkan oleh gelombang per satuan panjang



Gambar 12 Pengumpulan data

d. Teknik Analisis Data

Data yang dikumpulkan dari eksperimen dianalisis dengan menggunakan statistik deskriptif, yang mencakup perhitungan rata-rata dan koefisien variasi (CV) untuk menilai kestabilan gelombang. Perbandingan dilakukan antara piston datar dan piston lengkung berdasarkan parameter gelombang yang dihasilkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan dilakukan dengan dua jenis piston (datar dan lengkung) pada tiga variasi waktu aktuasi (400 ms - 200 ms, 300 ms - 300 ms, dan 300 ms - 150 ms). Data gelombang yang dihasilkan oleh kedua jenis piston dianalisis menggunakan perangkat lunak Tracker untuk mengukur parameter gelombang seperti tinggi gelombang (H), panjang gelombang (λ), periode (T), kecepatan gelombang (C), energi gelombang (E), dan daya gelombang (P).

Tabel 2 Hasil pengukuran gelombang

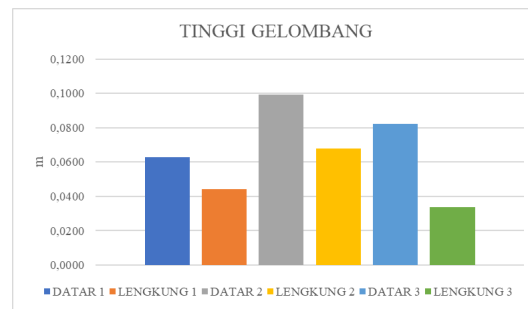
Jenis Piston	Waktu Aktuasi	Tinggi Gelombang (m)	Panjang Gelombang (m)	Periode (s)	Kecepatan Gelombang (m/s)	Energi Gelombang (J/m)	Daya Gelombang (W/m)
Piston Datar	400 ms - 200 ms	0.0993	1.5	2.4	0.62	12.208	9.387
Piston Datar	300 ms - 300 ms	0.0955	1.4	2.3	0.58	10.532	8.772
Piston Datar	300 ms - 150 ms	0.0917	1.3	2.1	0.55	9.654	7.895
Piston Lengkung	400 ms - 200 ms	0.0677	1.2	2.6	0.55	5.673	4.550
Piston Lengkung	300 ms - 300 ms	0.0621	1.1	2.4	0.52	4.873	4.195
Piston Lengkung	300 ms - 150 ms	0.0592	1.0	2.3	0.50	4.124	3.654

Pada “Tabel 2” menyajikan hasil pengukuran gelombang yang dihasilkan oleh sistem pneumatik dengan dua jenis piston (datar dan lengkung) pada tiga variasi waktu aktuasi yang berbeda. Tabel ini mencakup parameter-parameter gelombang.

a. Tinggi Gelombang

Tabel 3 Tinggi Gelombang

Variasi	datar			Lengkung		
	Mean (m)	CV (%)	Stabilitas	Mean (m)	CV (%)	Stabilitas
1	0,0626	11,06%	Kurang Stabil	0,0444	10,1%	Stabil
2	0,0993	10,16%	Stabilitas	0,0677	9,8%	Stabil
3	0,0824	19,76%	Tidak Stabil	0,0339	27,1%	Tidak Stabil



Gambar 13 Tinggi Gelombang

Pada “Gambar 13” menunjukkan perbandingan tinggi gelombang yang dihasilkan oleh piston datar dan piston lengkung pada tiga variasi waktu aktuasi, pada “Tabel 3” menyajikan nilai rata-rata (mean) dan koefisien variasi (CV) untuk menilai kestabilan gelombang, sementara "Gambar 13" menggambarkan grafik yang memvisualisasikan fluktuasi tinggi gelombang dan stabilitasnya berdasarkan nilai CV, yang menggambarkan perbedaan performa antara kedua jenis piston.

b. Panjang Gelombang

Tabel 4 Panjang Gelombang

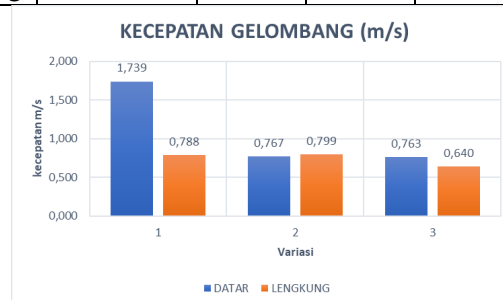
Variasi	datar			Lengkung		
	Mean (m)	CV (%)	Stabilitas	Mean (m)	CV (%)	Stabilitas
1	1,0427	2,08%	Stabil	0,4735	4,16%	Stabil
2	0,4616	4,27%	Stabil	0,4795	3,69%	Stabil
3	0,3383	6,65%	Stabil	0,2888	12,54%	Tidak Stabil

Pada “Tabel 4” menyajikan perbandingan panjang gelombang yang dihasilkan oleh piston datar dan piston lengkung pada tiga variasi waktu aktuasi. Tabel ini mencakup nilai rata-rata (*mean*) dan koefisien variasi (CV) untuk masing-masing jenis piston, memberikan gambaran tentang stabilitas panjang gelombang yang dihasilkan pada setiap kondisi percobaan.

c. Kecepatan Gelombang

Tabel 5 Kecepatan Gelombang

Variasi	Piston	Rata-Rata	Maks	Min	SD	CV	Kategori
		m/s					
1	Datar	1,7392	1,8772	1,6192	0,0607	3,49	Stabil
	Lengkung	0,7884	0,9288	0,718	0,0516	6,54	Kurang
2	Datar	0,7668	0,9326	0,6542	0,0556	7,26	Kurang
	Lengkung	0,7994	0,9004	0,7203	0,0404	5,05	Kurang
3	Datar	0,7441	0,9093	0,6357	0,0667	8,96	Kurang
	Lengkung	0,64	0,8333	0,4827	0,078	12,19	Tidak



Gambar 14 Grafik Kecepatan Gelombang

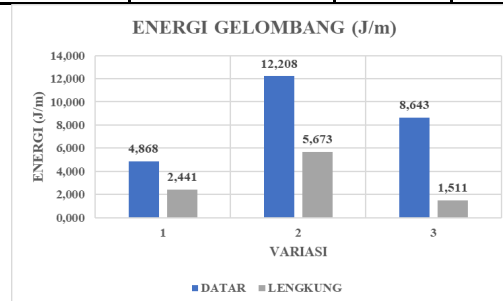
Pada “Tabel 5” dan “Gambar 14” menunjukkan perbandingan kecepatan gelombang yang dihasilkan oleh piston datar dan piston lengkung pada tiga variasi waktu aktuasi. Pada “Tabel 5” menyajikan nilai rata-rata, maksimum, minimum, deviasi standar (SD), dan koefisien variasi (CV) untuk kecepatan

gelombang, sedangkan pada “Gambar 14” menggambarkan grafik yang memvisualisasikan perbedaan kecepatan gelombang antara kedua jenis piston, memberikan gambaran yang lebih jelas tentang kestabilan dan fluktuasi kecepatan gelombang dalam setiap variasi waktu aktuasi.

d. Energi Gelombang

Tabel 6 Energi gelombang

Variasi	Bentuk Piston	RATA-RATA	MAKS	MIN	SD	CV
		J/m				%
1	Datar	4,868	6,500	2,458	1,029	21%
	Lengkung	2,441	3,414	1,736	0,499	20%
2	Datar	12,208	19,533	6,546	2,445	20%
	Lengkung	5,673	7,501	3,688	1,094	19%
3	Datar	8,643	16,731	3,195	3,269	38%
	Lengkung	1,511	3,610	0,392	0,804	53%



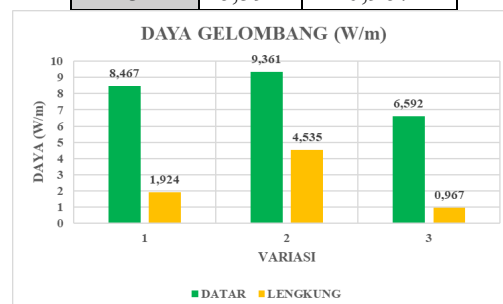
Gambar 15 Grafik Energi Gelombang

Pada “Tabel 6” menyajikan nilai rata-rata, maksimum, minimum, deviasi standar (SD), dan koefisien variasi (CV) untuk energi gelombang, sementara pada “Gambar 15” menggambarkan grafik yang memvisualisasikan perbedaan energi gelombang antara kedua jenis piston, memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai fluktuasi dan kestabilan energi gelombang yang dihasilkan dalam setiap kondisi percobaan.

e. Daya Gelombang

Tabel 7 Daya Gelombang

Variasi	Rata-rata Daya W/m	
	Datar	Lengkung
1	8,467	1,924
2	9,361	4,535
3	6,592	0,967



Gambar 16 Grafik daya gelombang

Pada “Tabel 7” menyajikan nilai rata-rata daya gelombang (W/m) untuk masing-masing jenis piston, sedangkan pada “Gambar 16” menggambarkan grafik yang memvisualisasikan perbedaan daya gelombang antara piston datar dan piston lengkung, memberikan gambaran yang lebih jelas tentang fluktuasi dan kestabilan daya yang dihantarkan oleh gelombang dalam setiap kondisi percobaan.

Dari hasil percobaan yang diperoleh, dapat dilihat bahwa piston datar menghasilkan gelombang dengan tinggi gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan piston lengkung pada semua variasi waktu aktuasi. Hal ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa piston datar menghasilkan perubahan volume udara yang lebih besar, sesuai dengan prinsip Hukum Boyle, yang menyebabkan tekanan yang lebih besar pada silinder dan menghasilkan amplitudo gelombang yang lebih tinggi.

Namun, meskipun piston datar menghasilkan gelombang dengan amplitudo yang lebih besar, kestabilan gelombang yang dihasilkan lebih rendah. Hal ini terlihat dari koefisien variasi (CV) yang lebih tinggi pada piston datar, yang menunjukkan fluktuasi yang lebih besar dalam siklus gelombang. Sebaliknya, piston lengkung menghasilkan gelombang yang lebih stabil, meskipun amplitudo nya lebih kecil. Piston lengkung memberikan kestabilan yang lebih tinggi karena perubahan volume udara yang lebih terkontrol, yang mengurangi fluktuasi gelombang antar siklus.

Pada energi gelombang, piston datar menghasilkan energi yang lebih besar pada setiap siklus gelombang dibandingkan dengan piston lengkung. Ini menunjukkan bahwa piston datar lebih efisien dalam menghasilkan energi gelombang per satuan panjang. Namun, daya gelombang yang dihantarkan oleh piston lengkung lebih stabil dan lebih konsisten pada berbagai variasi waktu aktuasi.

Kecepatan gelombang pada kedua jenis piston juga menunjukkan perbedaan. Piston datar menghasilkan gelombang dengan kecepatan sedikit lebih tinggi dibandingkan piston lengkung pada waktu aktuasi yang sama. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan dalam bentuk piston yang mempengaruhi perpindahan air selama proses pembangkitan gelombang.

5. KESIMPULAN

- 1) Piston Datar menghasilkan gelombang dengan amplitudo yang lebih besar dibandingkan dengan piston lengkung pada semua variasi waktu aktuasi yang diuji. Hal ini menunjukkan bahwa piston datar lebih efektif dalam menghasilkan gelombang dengan energi yang lebih tinggi.
- 2) Piston Lengkung, meskipun menghasilkan gelombang dengan amplitudo lebih kecil, menunjukkan kestabilan yang lebih tinggi. Koefisien variasi (CV) yang lebih rendah pada piston lengkung menunjukkan bahwa gelombang yang dihasilkan lebih konsisten dan terkontrol.
- 3) Tekanan Udara berperan penting dalam mengatur tinggi gelombang dan energi gelombang. Peningkatan tekanan udara cenderung meningkatkan tinggi dan energi gelombang yang dihasilkan, namun juga dapat menurunkan kestabilan gelombang jika tidak diatur dengan baik.
- 4) Kecepatan Gelombang: Piston datar menghasilkan gelombang dengan sedikit kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan piston lengkung, yang menunjukkan bahwa bentuk piston mempengaruhi laju perambatan gelombang.
- 5) Rekomendasi: Untuk aplikasi yang membutuhkan gelombang dengan amplitudo tinggi, piston datar lebih disarankan. Namun, untuk aplikasi yang membutuhkan gelombang stabil dan konsisten, piston lengkung lebih efektif. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan tekanan udara dalam sistem pneumatik untuk mendapatkan keseimbangan antara energi gelombang dan kestabilan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan wawasan mengenai bagaimana bentuk piston dan tekanan udara mempengaruhi kinerja sistem pembangkit gelombang pneumatik, yang dapat diterapkan dalam desain alat uji gelombang atau aplikasi lain yang memanfaatkan gelombang buatan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Hengky Iriawan. *POTENSI DAN PENGELOLAAN SUMBER DAYA KELAUTAN INDONESIA* Henky Irawan. <https://www.researchgate.net/publication/380149032> (2024).
2. Chakrabarti, S. K. *HANDBOOK OF OFFSHORE ENGINEERING Volume I 2005 ELSEVIER*. www.bookaid.org (2005).
3. Wijaya, R. C., Pd, S. & Pd, M. *MEKANIKA GELOMBANG LAUT DAN SUNGAI*.
4. Robert G. Dean & Robert A. Dalrymple. *WATER WAVE MECHANICS FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS*. vol. 2 (World Scientific Publishing Company, 1991).
5. J. William Kamphuis. *Introduction to Coastal Engineering and Management*. vol. 16 (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004).
6. ROBERT G. DEAN & ROBERT A. DALRYMPLE. *COASTAL PROCESSES with Engineering Applications*. (2004).

7. João Cruz. *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. (Springer Berlin, Berlin Heidelberg, 2008).
8. Turgut Satpkaya & Michael Isaacson. *Mechanics of wave forces on offshore structures*. (2017).
9. Hubert Chanson. *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures Second Edition*. (Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004).
10. Park, J., Cho, D. & Jang, T. A numerical experiment on a new piston-type wavemaker: Shallow water approximation. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* **15**, (2023).
11. U.S. Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering Manual, CEM Part VI-Chap 5p2, Fundamentals of Design*. (2002).
12. Liu, Y., Zheng, Y., Song, R., Chen, J. & Jin, H. Wave generation characteristic analysis of piston and flap type wave maker with rotary-valve-control vibrator. *JVC/Journal of Vibration and Control* **26**, 1297–1308 (2020).
13. Brooks, W. R. , & S. T. H. F. W. R. Design of Pneumatic Wave Makers for Small-Scale Tank Testing. (2003).
14. Esposito, Anthony. *Fluid Power with Applications*. (Pearson Education Limited, 2014).
15. Ut Jasron, J. *et al. Penerapan Analisis Dimensional Pada Perubahan Tekanan Udara Perangkat Oscillating Water Column (OWC)*. vol. 24 (2022).
16. Razavi, S. S., Shafaghat, R., Kharkeshi, B. A. & Eskandari, J. 3D Numerical Modeling and Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Device in Sloshing Conditions Using Openfoam and Genetic Algorithms. *Journal of Applied Fluid Mechanics* **17**, 233–250 (2024).
17. Crema, I., Simonetti, I., Cappietti, L. & Oumeraci, H. *Laboratory Experiments on Oscillating Water Column Wave Energy Converters Integrated in a Very Large Floating Structure*. <https://www.researchgate.net/publication/281900091> (2015).
18. Wang, D. J. & Katory, M. *Hydrodynamic Analysis of Pneumatic Wave Power Generators*. www.witpress.com, (1996).
19. Freire De Souza, C. A. G. & Mitio Morishita, H. *EVALUATION OF A FLAP TYPE WAVE GENERATOR*. (2003).
20. Roh, C. Enhancing Power Generation Stability in Oscillating-Water-Column Wave Energy Converters through Deep-Learning-Based Time Delay Compensation. *Processes* **11**, (2023).
21. Chandler, I., Allsop, W., Robinson, D. & Rossetto, T. Evolution of Pneumatic Tsunami Simulators–From Concept to Proven Experimental Technique. *Front Built Environ* **7**, (2021).
22. Peng, J. *et al.* Storage Regulation Mechanism and Control Strategy of a Hydraulic Wave Power Generation System. *Energies (Basel)* **17**, (2024).
23. Liu, Z. *et al.* An Improved Hydraulic Energy Storage Wave Power-Generation System Based on QPR Control. *Energies (Basel)* **16**, (2023).
24. Liu, Z., Liu, S., Chen, W., Yang, Y. & Feng, G. Implementation and optimization of hydraulic wave energy generation system. *PLoS One* **19**, (2024).
25. Iguchi, T. & Lannes, D. *HYPERBOLIC FREE BOUNDARY PROBLEMS AND APPLICATIONS TO WAVE-STRUCTURE INTERACTIONS*. (2018).
26. Thi Yen Vu, L. *et al.* Design and fabrication of wave generator using an oscillating wedge. *Science & Technology Development Journal - Engineering and Technology* **3**, First (2020).
27. Gispert, C. *Analysis and Dynamical Modeling of a Piston Valve for a Wave Energy Converter*. (2015).
28. Gyongy, I., Richon, J. B., Bruce, T. & Bryden, I. Validation of a hydrodynamic model for a curved, multi-paddle wave tank. *Applied Ocean Research* **44**, 39–52 (2014).
29. White, T. L. & Mcburney, D. H. *Research Methods*. (2019).
30. Konispoliatis, D. Floating Oscillating Water Column Wave Energy Converters: A Review of Developments. *Journal of Energy and Power Technology* **06**, 1–29 (2024).
31. Gayathri, R., Chang, J. Y., Tsai, C. C. & Hsu, T. W. Wave Energy Conversion through Oscillating Water Columns: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering* vol. 12 Preprint at <https://doi.org/10.3390/jmse12020342> (2024).
32. Shalby, M. *et al.* Experimental Investigation of the Small-scale Fixed Multi-chamber OWC Device. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* **34**, (2021).
33. Cannata, G., Simone, M. & Gallerano, F. Numerical Investigation into the Performance of an OWC Device under Regular and Irregular Waves. *J Mar Sci Eng* **11**, (2023).
34. Montgomery, D. C. . *Design and Analysis of Experiments*. (John Wiley & Sons, Inc., 2013).
35. George E. P. Box, W. G. H. J. S. H. Statistics for Experimenters. (2018).
36. Prof. Dr. Sugiyono. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. (2017).
37. Creswell, J. W. *RESEARCH DESIGN Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches SECOND EDITION*. (2014).
38. Yin, R. K. *Case Study Research and Applications. Sixth Edition*. (2018).
39. Arthur Pecher & Jens Peter Kofoed. *Handbook of Ocean Wave Energy*. **7**, (2017).
40. Ulrich, K. T. ., Eppinger, S. D. . & Yang, M. C. . *Product Design and Development*. (McGraw-Hill Education, 2020).