

Studi Eksperimental Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme *Ocean Wave Energy Harvester* Tipe Pelampung Bola dengan Metode *Cantilever Piezoelectric*

Almaarif Fahrey Nuh dan Wiwiek Hendrowati

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: haruslg@me.its.ac.id

Abstrak—Indonesia sebagai negara Kepulauan memiliki potensi energi laut yang besar di mana energi gelombang laut merupakan jenis energi laut yang paling siap untuk diterapkan di Laut Indonesia. Salah satu lokasi potensi untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) adalah Pulau Poteran, sebelah utara Pulau Madura, Jawa Timur dengan potensi energi mencapai 1300 W/m². Pada penelitian ini dibuat sebuah prototipe alat *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric* dalam skala laboratorium dengan mengacu pada gelombang laut di daerah Poteran sebagai referensi pembuatan alat skala sebenarnya yang dapat diterapkan di perahu-perahu nelayan Pulau Poteran. Mekanisme *Energy harvester* ini dibuat dengan memanfaatkan frekuensi gelombang laut yang ditangkap oleh pelampung dan diteruskan menuju mekanisme gear box. Mekanisme gear box digunakan untuk meningkatkan frekuensi *cantilever piezoelectric* hingga mendekati frekuensi resonansi. Mekanisme gear box tersebut dilengkapi dengan blade pemukul yang nantinya memberikan gaya impact pada *cantilever piezoelectric* sehingga material tersebut mengalami defleksi. Defleksi inilah yang menimbulkan voltase atau energi listrik pada *cantilever piezoelectric*. Pada penelitian ini, dilakukan analisa dengan variasi jumlah *cantilever piezoelectric*, dan amplitudo gelombang laut dengan nilai secara berturut-turut adalah 1 buah, 2 buah, 3 buah, 3,52 cm, 3,92 cm dan 4,7 cm. Dari hasil pengujian eksperimen dengan variasi amplitudo gelombang dan jumlah *piezoelectric*, didapatkan nilai daya listrik bangkitan terbesar adalah $3,476 \times 10^{-7}$ watt pada amplitudo 4,7 cm dan jumlah *piezoelectric* sebanyak 3 buah.

Kata Kunci—*cantilever piezoelectric*, *energy harvesting*, frekuensi, gelombang laut, pelampung bola.

I. PENDAHULUAN

Potensi sumber daya energi laut Indonesia yang meliputi energi gelombang, pasang surut, dan panas laut mencapai 727.000 MW dengan perkiraan energi efektif yang dapat dimanfaatkan dengan teknologi sekarang berkisar 49.000 MW. Hingga saat ini, sudah terdapat beberapa penelitian-penelitian dan pengembangan mengenai metode pemanen energi laut untuk dikonversi menjadi energi listrik sebagai pembangkit listrik di Indonesia, baik hanya dalam bentuk simulasi pemodelan mekanisme, hingga melakukan eksperimen secara langsung.

Dari beberapa jenis energi laut yang dapat dimanfaatkan, penelitian mengenai pemanfaatan energi gelombang laut dipilih sebagai tema penelitian ini karena

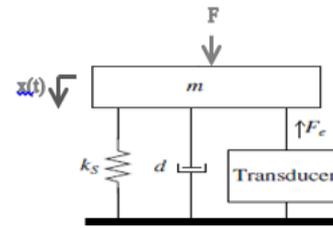
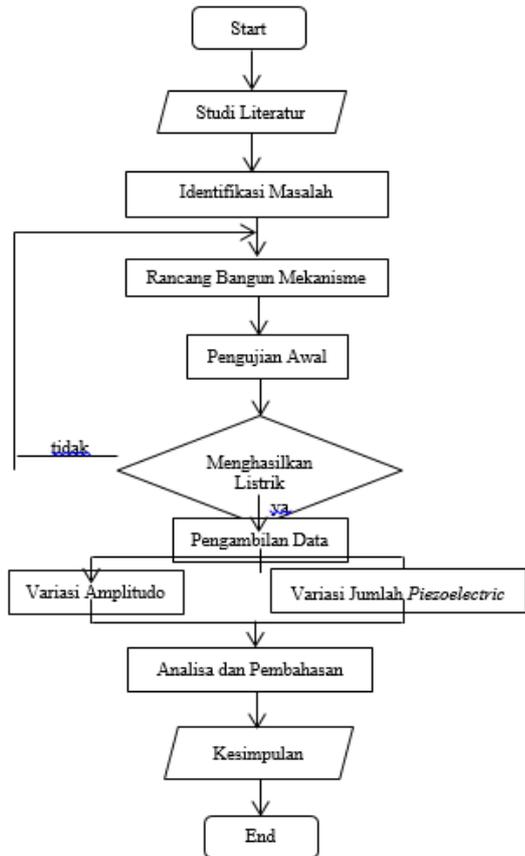
teknologi yang ada sekarang paling siap untuk diterapkan di laut Indonesia. Selain itu, sudah terdapat pula studi atau penelitian mengenai lokasi-lokasi di Indonesia yang berpotensi menjadi lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL), salah satunya yaitu Pulau Poteran. Pulau Poteran terletak di bagian tenggara Pulau Madura, Jawa Timur dengan potensi energi laut sekitar 1300 W/m².

Selain lokasi, sudah terdapat pula beberapa metode yang diteliti untuk menjadi pemanen energi gelombang laut diantaranya, *salter duck*, metode pelampung, dan *cantilever piezoelectric*. Diantara metode tersebut, pada penelitian ini dilakukan penelitian dengan metode *cantilever piezoelectric*. *Piezoelectric* merupakan suatu material yang memiliki kemampuan untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik ataupun sebaliknya. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penggunaan *cantilever piezoelectric* untuk memanen energi laut secara langsung hanya mampu menghasilkan daya pada ukuran miliwatt. Hal ini menunjukkan bahwa perlunya sebuah mekanisme baru untuk memaksimalkan potensi defleksi dan frekuensi resonansi dari *cantilever piezoelectric*.

Untuk itu, pada penelitian tugas akhir ini dibuat sebuah *prototype* alat *energy harvesting* metode *cantilever piezoelectric* dalam skala laboratorium dengan mengacu pada gelombang laut di daerah Poteran sebagai referensi pembuatan alat skala sebenarnya yang dapat diterapkan di perahu-perahu nelayan di Pulau Poteran. *Energy harvesting* ini menggunakan mekanisme gear box untuk meningkatkan frekuensi *cantilever piezoelectric* hingga mendekati frekuensi resonansi. Dimana penelitian ini memanfaatkan energi kinetik yang dihasilkan oleh gelombang laut dan selanjutnya akan disalurkan menuju massa yang dilengkapi oleh pegas di atasnya serta *rack* di salah satu sisinya, gear box nantinya akan memutar *blade* yang akan memukul *cantilever piezoelectric*.

II. URAIAN PENELITIAN

Tahap-tahap pengerjaan tugas akhir yang dilaksanakan dapat dilihat pada diagram alir di bawah ini:



Gambar 2.1. Free body diagram dari piezoelectric [8]

Berdasarkan *free body diagram* dari *piezoelectric* tersebut, diperoleh persamaan gaya yang bekerja pada *piezoelectric* adalah sebagai berikut:

$$F = m\ddot{x}_p + K_s x_p + d\dot{x}_p + F_e \tag{2.3}$$

Pada dasarnya voltase bangkitan yang dihasilkan material *piezoelectric* disebabkan oleh adanya muatan yang berbeda-beda antar partikel dalam *piezoelectric* itu sendiri. Dan ketika *piezoelectric* tersebut menerima gaya eksternal maupun mengalami defleksi, hal ini menyebabkan jarak antar partikel tersebut berubah baik itu semakin jauh atau semakin dekat. Akibat adanya perbedaan jarak, maka akan timbul beda potensial tegangan bangkitan, V_p , yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_p = \frac{3 d_{31} E w t x_p}{4 C} \tag{2.4}$$

dimana :

- V_p = Tegangan bangkitan (V)
- d_{31} = Konstanta Regangan *Piezoelectric* (C/N)
- E = Modulus Young (N/m²)
- w = Lebar Material *Piezoelectric* (m)
- t = Tebal Material *Piezoelectric* (m)
- x_p = Defleksi Material *Piezoelectric* (m)
- C = Kapasitansi Material *Piezoelectric* (F)

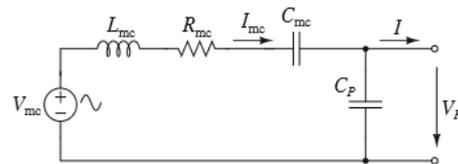
Sedangkan kapasitansi *piezoelectric* sendiri dirumuskan sebagai berikut:

$$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot L \cdot W}{T} \tag{2.5}$$

dimana:

- C = kapasitansi (F)
- ϵ_{33}^T = *permittivity* material terhadap tegangan konstan
- L = panjang material *piezoelectric* (m)
- T = tebal lapisan *piezoelectric* (m)
- W = lebar material *piezoelectric* (m)

Untuk memperoleh nilai arus dari *piezoelectric harvester*, terlebih dahulu dilakukan pemodelan *piezoelectric harvester* secara sederhana seperti pada gambar 2.2 berikut ini:



Gambar 2.2. Pemodelan Piezoelectric Harvester [8]

Dari rangkaian tersebut didapatkan persamaan V_{mc} sebagai berikut:

$$V_{mc} = L_{mc} \frac{dI_{mc}}{dt} + R_{mc} I_{mc} + \frac{1}{C_{mc}} \int I_{mc} dt + V_p \tag{2.6}$$

Dengan nilai $\Gamma = \sqrt{k_{31} k_p C_p}$, nilai $V_{mc} = \frac{F_{impact}}{\Gamma}$, nilai $L_{mc} = \frac{m}{\Gamma^2}$, nilai $R_{mc} = \frac{d}{\Gamma^2}$, dan nilai $C_{mc} = \frac{\Gamma^2}{k}$ maka nilai I_{mc} dapat diperoleh.

Sedangkan untuk daya yang dibangkitkan oleh *energy harvester* diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

A. Studi Literatur

1) Gelombang Laut

Gelombang laut merupakan gerakan naik turunnya air laut. Gelombang laut terjadi karena adanya hembusan angin yang berlangsung secara kontinu dan teratur di atas permukaan laut. Hembusan angin tersebut membentuk riak permukaan yang bergerak searah dengan hembusan angin, dan bila angin berhembus dalam waktu yang panjang dengan jarak yang cukup panjang, maka riak tersebut akan membentuk gelombang laut. Besarnya daya yang dimiliki oleh gelombang laut adalah sebagai berikut.

$$P_w = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \left(\cos \frac{2\pi}{T} \right)^2 \tag{2.1}$$

Dari nilai P_w atau daya gelombang tersebut didapatkan persamaan gaya gelombang yaitu:

$$F_{wave} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi c g} \left(\cos \frac{2\pi}{T} \right)^2 \tag{2.2}$$

Keterangan:

- g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)
- ρ = densitas air (1000kg/m³)
- H = tinggi gelombang (m)
- T = periode gelombang (s)

2) Piezoelectric

Ketika suatu material *piezoelectric* diberikan tegangan mekanik, polarisasi listrik yang sebanding dengan tegangan yang diterapkan akan mengakibatkan timbulnya muatan/tegangan listrik. Efek *piezoelectric* ini berlaku reversibel, artinya material *piezoelectric* juga akan menghasilkan tegangan dan/atau regangan mekanik apabila material *piezoelectric* dialiri oleh listrik.

Besarnya gaya mekanik yang diterima oleh *piezoelectric* secara umum dapat dilihat pada gambar berikut:

$$P = V_p \cdot I_{mc}$$

2.7.

3) Karakteristik Gelombang Laut Pulau Poteran

Berdasarkan penelitian dari Zulfikar Adlan pada tahun 2015 dengan menggunakan media citra satelit ALOS-PALSAR diperoleh karakteristik gelombang laut Pulau Poteran sebagai berikut:

1. Amplitudo signifikan gelombang laut sebesar 3,713 meter
2. Amplitudo rata-rata gelombang laut adalah sebesar 2,986 meter
3. Panjang gelombang dominan sebesar 559,017 dan 883,883 meter
4. Periode gelombang sebesar 56,579 dan 89,360 sekon
5. Estimasi energi laut menggunakan metode *wave height* adalah sebesar 182 hingga 1317 W/m²
6. Estimasi energi laut menggunakan metode amplitudo adalah sebesar 258 W/m²

B. Identifikasi Masalah

Pada tahap ini, topik dari penelitian yang dilakukan telah ditentukan yaitu mengenai pemanfaatan energi laut sebagai energi alternatif yang terbarukan, termasuk melakukan perancangan dan pembuatan mekanismenya dalam skala laboratorium. Tahap ini bertujuan untuk memilih input yang divariasikan. Variasi yang diinputkan yaitu berupa variasi jumlah piezoelectric dan amplitudo gelombang.

a. Variasi amplitudo gelombang

Pengujian ini menggunakan tiga variasi amplitudo gelombang yaitu 3.9cm, 4.1 cm, dan 4.9 cm.

b. Variasi jumlah piezoelectric.

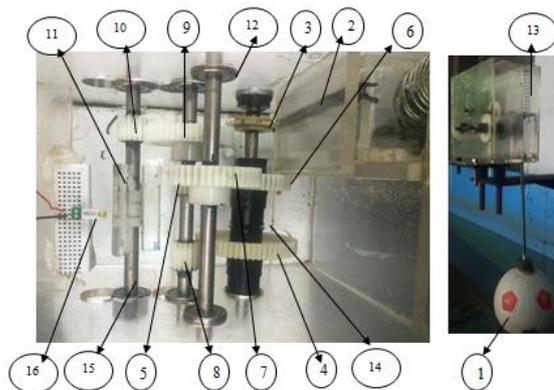
Pengujian ini menggunakan tiga variasi jumlah piezoelectric yaitu 1, 2, dan 3 buah piezoelectric yang elektrisnya disusun secara seri.

C. Perancangan Mekanisme

Prototype ini terdiri dari massa yang dilengkapi dengan pelampung yang diapungkan di permukaan air. Dimana saat gelombang mencapai pelampung, pelampung akan bergerak translasi dan menggerakkan rack yang dihubungkan dengan pelampung serta menggerakkan roda gigi. Roda gigi yang digunakan adalah jenis roda gigi lurus (*spur gear*) yang berfungsi untuk mengubah gerak translasi menjadi rotasi. Selain itu prototype ini dilengkapi blade yang akan memberikan gaya *impact* kepada *cantilever piezoelectric*. Gaya *impact* ini akan memberikan defleksi pada *cantilever piezoelectric* sehingga piezoelectric menghasilkan energi listrik. Gambar 2.5. dan 2.6. menunjukkan prototipe mekanisme yang dibuat:



Gambar 2.5. Peletakan Mekanisme di Kolam Pengujian

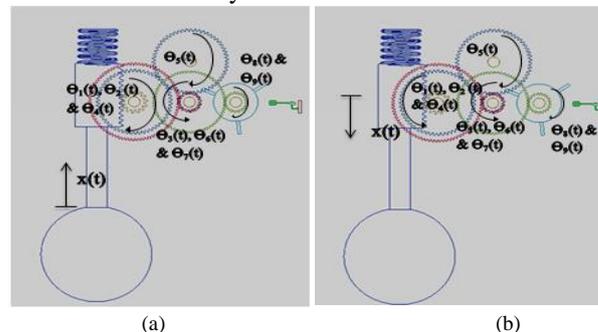


Gambar 2.6. Bagian-bagian dari Mekanisme

Keterangan gambar:

- | | |
|--------------------------------------|------------------------|
| 1. Pelampung Bola | 9. Gear 7 (D = 5cm) |
| 2. Rack yang dilengkapi dengan chain | 10. Gear 8 (D = 1,4cm) |
| 3. Sprocket (Gear 1) | 11. Blade (Gear 9) |
| 4. Gear 2 (D = 6cm) | 12. Bearing |
| 5. Gear 3 (D = 1,4cm) | 13. Pegas |
| 6. Gear 4 (D = 5cm) | 14. One-way Bearing |
| 7. Gear 5 (D = 5cm) | 15. Poros |
| 8. Gear 6 (D = 1,4cm) | 16. Piezoelectric |

Berdasarkan acuan pada perancangan mekanisme, langkah selanjutnya yaitu membuat persamaan gerak dari mekanisme tersebut yakni:



Gambar 2.7. Gerakan mekanisme (a) gerakan naik, (b) gerakan turun

III. ANALISA DAN PEMBAHASAN

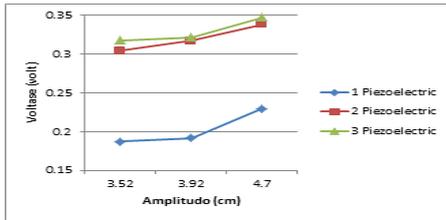
Dari hasil data pengujian dengan variasi amplitudo dan jumlah piezoelectric, dilakukan pembahasan voltase, arus, dan daya rata-rata berdasarkan hasil *root mean square* masing-masing variasi seperti tercantum dalam tabel 4.1. berikut ini.

TABEL 3.1 NILAI ROOT MEAN SQUARE DARI HASIL PENGUJIAN

Jumlah Piezo	Amplitudo (cm)	Vrms (Volt)	Irms (Ampere)	Prms (Watt)
1	3.52	0.1879	4×10^{-7}	$7,52 \times 10^{-8}$
	3.92	0.1923	6×10^{-7}	$1,15 \times 10^{-7}$
	4.7	0.2298	1×10^{-6}	$2,3 \times 10^{-7}$
2	3.52	0.3048	4×10^{-7}	$1,22 \times 10^{-7}$
	3.92	0.3171	6×10^{-7}	$1,90 \times 10^{-7}$
	4.7	0.3383	1×10^{-6}	$3,38 \times 10^{-7}$
3	3.52	0.3179	4×10^{-7}	$1,27 \times 10^{-7}$
	3.92	0.3216	6×10^{-7}	$1,93 \times 10^{-7}$
	4.7	0.3476	1×10^{-6}	$3,48 \times 10^{-7}$

Dari pengujian yang telah dilakukan dengan variasi amplitudo gelombang dan jumlah piezoelectric didapatkan hasil dalam bentuk grafik excel. Dari variasi yang diberikan tersebut dapat diketahui pengaruhnya terhadap energi listrik yang dihasilkan meliputi tegangan bangkitan (V_p), arus (I) dan daya (P).

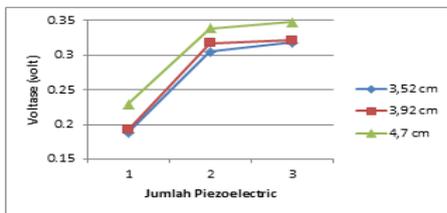
A. Pengaruh Variasi Amplitudo terhadap Voltase Bangkitan Piezoelectric



Gambar 3.1. Grafik Pengaruh Amplitudo terhadap Voltase RMS Pengujian

Dari gambar di atas dapat kita lihat pengaruh variasi amplitudo terhadap voltase bangkitan hasil pengujian dimana semakin besarnya amplitudo gelombang laut maka voltase bangkitannya juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan pertambahan amplitudo menyebabkan pertambahan nilai gaya gelombang laut (Fwave). Gaya gelombang laut menjadi masukan untuk mekanisme *ocean wave energy harvester ini*. Semakin meningkatnya gaya gelombang menyebabkan meningkatnya pula kecepatan sudut pada *blade*. Kecepatan sudut *blade* berbanding lurus dengan gaya pukul yang diberikan oleh *blade* kepada *piezoelectric*. Sehingga semakin meningkat defleksi yang terjadi pada *piezoelectric*, dan semakin meningkat pula voltase bangkitan yang dihasilkannya.

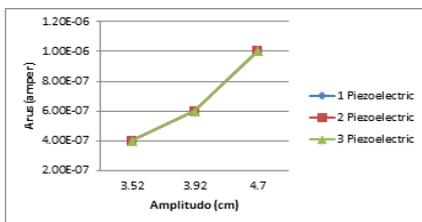
B. Pengaruh Variasi Jumlah Piezoelectric terhadap Voltase Bangkitan Piezoelectric



Gambar 3.2 Grafik Pengaruh Jumlah Piezoelectric terhadap Voltase RMS Pengujian

Dari gambar di atas dapat kita lihat nilai perbandingan voltase bangkitan terhadap jumlah *piezoelectric* dengan variasi amplitudo pada hasil pengujian, dimana semakin meningkatnya jumlah *piezoelectric* maka voltase bangkitannya juga akan semakin besar. Kenaikan *trendline* grafik perbandingan voltase rms dengan jumlah *piezoelectric* sesuai dengan teori yang ada, di mana kenaikan ini disebabkan karena *piezoelectric* berperan sebagai beban atau hambatan yang dialiri oleh arus listrik secara seri, sehingga akibat rangkaian seri tersebut nilai voltasenya meningkat seiring bertambahnya jumlah material *piezoelectric*.

C. Pengaruh Variasi Amplitudo Gelombang terhadap Arus Bangkitan Piezoelectric

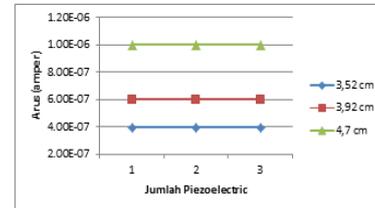


Gambar 3.3 Grafik Pengaruh Amplitudo terhadap Arus RMS Pengujian

Dari gambar di atas dapat kita lihat pengaruh variasi amplitudo terhadap arus bangkitan hasil pengujian. Dari

grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan semakin besarnya amplitudo gelombang laut maka arus bangkitannya juga akan semakin besar. Kenaikan arus ini disebabkan karena pertambahan amplitudo juga meningkatkan frekuensi putaran dari *blade* yang memukul *piezoelectric*. Semakin meningkatnya frekuensi putaran dari *blade* semakin meningkat pula pukulan *blade* kepada *piezoelectric*, sehingga semakin tinggi pula nilai arus yang dihasilkan oleh mekanisme.

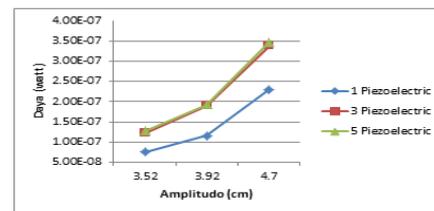
D. Pengaruh Variasi Jumlah Piezoelectric terhadap Arus Bangkitan Piezoelectric



Gambar 3.4 Grafik Pengaruh Jumlah Piezoelectric terhadap Arus RMS Pengujian

Dari gambar di atas dapat kita lihat nilai perbandingan arus bangkitan terhadap jumlah *piezoelectric* dengan variasi amplitudo pada hasil pengujian. *Trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di gambar 3.4 memiliki kesamaan, yaitu memiliki nilai yang konstan seiring dengan peningkatan jumlah *piezoelectric*. *Trendline* ini terjadi dikarenakan *piezoelectric* dirangkai secara seri, dimana pada kasus ini material *piezoelectric* yang dianggap sebagai sebuah beban yang dilalui oleh arus listrik, maka nilai dari arus listrik yang melewati beban tersebut cenderung konstan

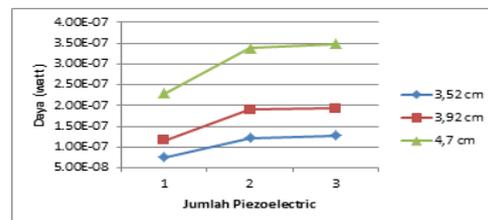
E. Pengaruh Variasi Amplitudo Gelombang terhadap Daya Bangkitan Piezoelectric



Gambar 3.5 Grafik Pengaruh Amplitudo terhadap Daya Bangkitan Pengujian

Gambar 3.5. merupakan grafik pengaruh amplitudo gelombang terhadap nilai daya bangkitan rata-rata dari mekanisme. *Trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di atas sama, yaitu mengalami peningkatan dari amplitudo 3,52 cm dengan frekuensi 1 Hz menuju amplitudo 4,7 cm dengan frekuensi 1,4 Hz. Adapun data daya terbesar berada pada amplitudo 4,7 cm, dengan jumlah *piezoelectric* 3 buah yaitu 3.476×10^{-7} Watt.

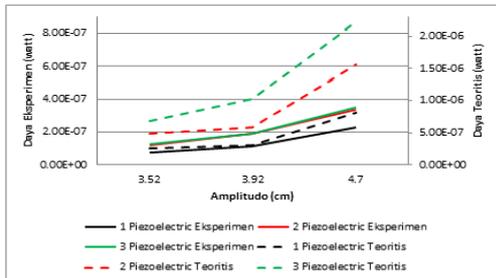
F. Pengaruh Variasi Jumlah Piezoelectric terhadap Daya Bangkitan Piezoelectric



Gambar 3.6 Grafik Pengaruh Jumlah Piezoelectric terhadap Daya Bangkitan Pengujian

Gambar 3.6 adalah grafik pengaruh jumlah *piezoelectric* terhadap daya bangkitan dari masing-masing variasi amplitudo hasil pengujian. *Trendline* yang terbentuk pada ketiga grafik di gambar 4.17 sama, yaitu meningkat seiring dengan peningkatan jumlah *piezoelectric*. Berdasarkan grafik, nilai daya tertinggi terjadi pada jumlah *piezoelectric* 3 dan amplitudo 4,7 cm yaitu 3.476×10^{-7} Watt

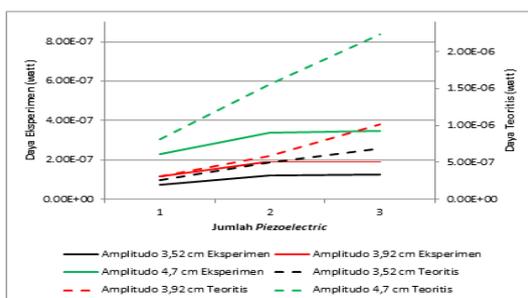
G. Perbandingan Pengaruh Amplitudo terhadap Daya bangkitan Hasil Pengujian dengan Teoritis



Gambar 3.7. Grafik Perbandingan Pengaruh Amplitudo terhadap Daya secara Teoritis dan Pengujian

Berdasarkan data pengujian pada tabel 3.1, grafik perbandingan daya terhadap amplitudo pada variasi jumlah *piezoelectric* yang ditunjukkan pada gambar 3.7 ini sudah sesuai dengan teori atau hasil simulasi, di mana secara teoritis semakin tinggi nilai amplitudo maka semakin tinggi pula nilai daya bangkitan yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena pertambahan amplitudo akan meningkatkan nilai voltase bangkitan akibat naiknya gaya gelombang laut (F_{wave}) dan meningkatkan nilai arus bangkitan akibat bertambahnya kecepatan putaran blade. Nilai daya yang dihasilkan oleh mekanisme akan berbanding lurus dengan bertambahnya nilai voltase dan arus listriknya, sehingga dengan bertambahnya nilai voltase dan arus bangkitan, maka nilai daya juga akan semakin tinggi. Namun, nilai daya hasil eksperimen cenderung lebih rendah dibandingkan dengan teoritis. Hal ini terjadi akibat gesekan yang terjadi antar gear, gesekan antara poros dengan bearing, dan inersia poros yang pada perhitungan teoritis diabaikan sedangkan memiliki efek cukup signifikan pada saat eksperimen, khususnya pada inersia poros.

H. Perbandingan Pengaruh Jumlah Piezoelectric terhadap Daya bangkitan Hasil Pengujian dengan Teoritis



Gambar 3.8. Grafik Perbandingan Pengaruh Jumlah Piezoelectric terhadap Daya secara Teoritis dan Pengujian

Dari data tersebut, grafik perbandingan jumlah *piezoelectric* terhadap daya bangkitan pada tiap-tiap variasi amplitudo ini sesuai dengan teori atau hasil simulasi, di mana secara teoritis semakin banyak jumlah *piezoelectric* semakin tinggi nilai daya yang dihasilkan.

Dimana peningkatan yang terjadi berbanding lurus dengan peningkatan voltase bangkitannya. Hal ini dikarenakan rangkaian elektrik pada material *piezoelektrik* adalah seri, yang mana nilai dari voltase akan semakin tinggi seiring dengan peningkatan jumlah *piezoelectric* dengan nilai arus yang tetap. Sedangkan pada grafik terlihat besarnya peningkatan daya pengujian yang tidak sesuai dengan daya teoritis yakni dari jumlah *piezoelectric* 2 buah menuju ke 3 buah. Hal ini dikarenakan pada jumlah *piezoelectric* 3 buah, kemampuan dari mekanisme untuk memukul *piezoelectric* menurun akibat ketahanan material yang meningkat. Hal ini menyebabkan nilai voltase bangkitan yang dihasilkan tidak meningkat secara signifikan, sehingga menyebabkan nilai daya yang dihasilkan juga tidak mengalami peningkatan yang signifikan.

I. Perbandingan Daya yang Dihasilkan oleh Mekanisme pada Skala Laboratorium dengan Skala Riil

Dalam perencanaan pembuatan mekanisme secara massal diperlukan sebuah estimasi atau perkiraan besarnya daya yang dihasilkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* apabila diterapkan pada gelombang laut riil. Pada perbandingan daya kali ini, digunakan kondisi eksisting gelombang laut pada Pulau Poteran yang mana digunakan sebagai referensi awal pembuatan mekanisme ini.

1) Mekanisme pada skala Laboratorium

Analisa menggunakan 3 piezo dengan rincian gaya wave yang diterima oleh mekanisme mengacu pada persamaan 2.2. dengan nilai amplitudo 4,7 cm dan frekuensi 1,4 Hz. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai *root mean square* dari defleksi *piezoelectric* yaitu sebesar 6 mm. Berdasarkan hasil simulasi defleksi tersebut didapatkan nilai sebagai berikut:

rms Voltase = 2,1616 V
 rms Arus = $1,23 \times 10^{-6}$
 rms Daya = $2,1141 \times 10^{-6}$

2) Mekanisme pada skala riil

Analisa dilakukan menggunakan 1 piezo dengan rincian gaya wave yang diterima oleh mekanisme mengacu pada persamaan 2.2. dengan nilai amplitudo 3,713 m dan frekuensi 0,0176 Hz. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai *root mean square* dari defleksi *piezoelectric* yaitu sebesar 72 cm. Berdasarkan hasil simulasi defleksi tersebut maka jumlah *piezoelectric* optimum yang dapat digunakan yakni berjumlah 120 buah, sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

rms Voltase = 9226,3 V
 rms Arus = 0,0162
 rms Daya = 121,28 watt

Sehingga besarnya daya yang dihasilkan pada skala laboratorium terhadap skala riil yaitu $2,141 \times 10^{-6} : 121,28 = 1 : 56.10^6$

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Setelah melakukan analisis dan pembahasan pada energi listrik yang dibangkitkan oleh mekanisme *ocean wave energy harvester* tipe pelampung bola dengan menggunakan metode *cantilever piezoelectric*, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu semakin tinggi amplitudo gelombang, semakin tinggi pula nilai voltase bangkitannya dan nilai arus yang dibangkitkan, sehingga

semakin tinggi pula nilai daya bangkitannya. Untuk variasi jumlah cantilever piezoelectric yang rangkaian elektriknya disusun secara seri, semakin meningkatnya jumlah material piezoelectric, maka nilai voltase akan semakin besar, sedangkan nilai arus listriknya tetap, sehingga nilai daya yang dihasilkan juga semakin meningkat. Daya listrik tertinggi yang mampu dibangkitkan oleh mekanisme adalah $3,476 \times 10^{-7}$ watt, di mana nilai ini terjadi ketika material piezoelectric berjumlah 3 pada amplitudo 4,7 cm

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mineto, A. (2010). Modeling of a Cantilever Beam for Piezoelectric Energy Harvesting. *9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications*.
- [2] Romano, G. F. (2015). *Studi Karakteristik Voltase Bangkitan yang Dihasilkan oleh Mekanisme Vibration Energy Harvesting Menggunakan Metode Cantilever Piezoelectric dengan Variasi Jumlah Blade dan Frekuensi Sumber Getar*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [3] Xie, X., Wang, Q., & Wu, N. (2014). *Potential of a Piezoelectric Energy Harvester from Sea Waves*. *Journal of Sound and Vibration*.
- [4] Susanto, I. M. (2015). *Studi Karakteristik Energi Listrik yang Dihasilkan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) Metode Pelampung dengan Variasi Dimensi Pelampung dan Panjang Lengan*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [5] S. Rao, S. (2004). *Mechanical Vibration*. Singapore: Prentice Hall PTR.
- [6] Ott, J. (2013). *Design of a Piezoelectric Energy Harvesting for Shallow Ocean Waves*. Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute Thesis: Renss.
- [7] Noven, K. A. (2011). *Studi Karakteristik Energi yang Dihasilkan Mekanisme Vibration Energy Harvesting dengan Metode Piezoelectric untuk Pembebanan Frontal dan Lateral*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Mesin: ITS Press.
- [8] Manoli, T. a. (2015). *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*. Springer Science+Business Media Dordrecht.
- [9] Deutschman, A. D., Michels, W., & dan Wilson, C. E. (1975). *Machine Design*. New York: Macmillan Publishing Co. Inc.
- [10] Nadzir, Z. A. (2015). *Estimasi Tinggi Gelombang Laut Menggunakan Citra Satelit ALOS-PALSAR Studi Kasus: Perairan Pulau Poteran, Sumenep*. Tugas Akhir pada Jurusan Teknik Geomatika: ITS Press.