

Penentuan Parameter Bandul Matematis untuk Memperoleh Energi Maksimum dengan Gelombang dalam Tangki

Eky Novianarenti, Yerri Susatio, Ridho Hantoro

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: hantoro@ep.its.ac.id

Abstrak— Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi mendorong manusia untuk terus berinovasi dan mencari energi alternatif yang potensial untuk dikonversikan menjadi energi listrik. Hal ini yang melatarbelakangi suatu simulasi energi gelombang dengan penggerak sistem bandul yang ditempatkan di dalam sebuah tangki. Tugas akhir ini difokuskan pada respon kecepatan gerak bandul dengan variasi massa dan panjang bandul untuk memperoleh energi maksimal dari sebuah bandul yang beresilasi secara harmonik terhadap guncangan air. Diawali dengan pemodelan matematis pada sistem ponton-bandul dengan tiga derajat kebebasan kemudian dilakukan analisa terhadap respon gerakan ponton. Tujuannya adalah untuk mendapatkan satu model yang paling optimum. Hasil dari analisa tersebut menunjukkan bahwa nilai kecepatan tertinggi didapatkan pada amplitudo 6cm dengan panjang lengan bandul 9 cm dan massa bandul 300 gr yaitu sebesar $783,8 \times 10^{-3}$ m/s dan kecepatan minimum didapatkan pada panjang lengan bandul 17 cm dan massa bandul 100 gr pada amplitudo 2 cm sebesar $2,4 \times 10^{-3}$ m/s. Ini menunjukkan bahwa semakin pendek lengan bandul, maka semakin tinggi kecepatan bandul dan dengan semakin besar massa bandul maka kecepatannya juga maksimum.

Kata Kunci— massa dan panjang lengan bandul, respon kecepatan, simulasi energi gelombang dalam tangki, sistem bandul

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan yang disatukan oleh lautan. Tetapi potensi energi kelautannya belum dimanfaatkan secara optimum terutama dalam membangkitkan tenaga listrik. Pembangkit Listrik Gelombang Laut dengan penggerak Sistem Bandulan (PLTGL-SB) merupakan salah satu unit peralatan alternatif untuk mengkonversikan energi gelombang laut buatan menjadi energi listrik. Energi gelombang laut merupakan energi terbarukan yang keberadaannya kontinyu dan sangat ramah lingkungan. Bila dimanfaatkan untuk membangkitkan tenaga listrik potensinya sangat besar tergantung pada ketinggian gelombangnya. Pembangkit ini umumnya dibangun di lepas pantai. Keberadaan pembangkit ini mampu mendorong pertumbuhan ekonomi masyarakat daerah pantai yang pada umumnya belum mengalir listrik. Selain itu mengurangi ketergantungan masyarakat terhadap bahan bakar minyak [1]. Studi mengenai PLTGL sistem bandulan ini sebelumnya dilakukan oleh Zamrisyaf salah satu staf perencanaan PLN di wilayah Sumatera Barat. Konsep pembangkit listrik tenaga gelombang laut sistem bandul ini sederhana yaitu dengan memanfaatkan fluktuasi gerakan gelombang air laut yang akan membuat bandul akan

bergerak seperti lonceng, gerakan tersebut kemudian ditransmisi ke dalam gerakan putar untuk menggerakkan dinamo kemudian menjadi energi listrik. Secara akademik studi ini perlu dilanjutkan untuk mengembangkan teknologi konversi energi kelautan menjadi energi listrik mengingat potensi kelautan di Indonesia belum *tereksplore* secara optimum [2].

Penelitian lain telah dilakukan oleh Ardi Noerpamungkas, (2011) [3] yang melakukan studi eksperimen terhadap respon akibat eksitasi harmonis pada ponton datar dengan gesekan torsional diabaikan dan rotasi ponton hanya pada sumbu x saja, sedang sumbu y dan z diabaikan.

Pada Tugas Akhir ini penulis mencoba mensimulasikan respon getaran bandul matematis pada simulator gelombang dalam tangki untuk memperoleh energi maksimal dari sebuah bandul matematis yang beresilasi secara harmonik terhadap guncangan air. Pemodelan dilakukan dengan memvariasikan lengan dan massa bandul agar mendapatkan energi yang optimal.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Pendayagunaan energi gelombang laut pertama di Indonesia dengan membuat teknologi PLTGL-SB atau Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandulan adalah salah satu teknologi karya Bapak Zamrisyaf dari Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero). Dalam laporan pekerjaan tahap I, studi pemodelan dan simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL – SB) kerjasama antara Badan Penelitian dan Pengembangan Ketenagalistrikan PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Sepuluh Nopember tahun 2010. Pembangkit listrik yang digagas Zamrisyaf dibuat dengan memanfaatkan tenaga gelombang laut dan sistem bandulan. Rancang bangunnya berbentuk ponton, sampan yang rendah dan lebar, yang ditempatkan mengapung di atas permukaan air laut[4].

Konsep Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandulan (PLTGL-SB) ini sebenarnya sederhana. Gerakan air laut akan menggerakkan ponton sesuai dengan alur dan fluktuasi gelombang air laut. Gerakan ponton akibat fluktuasi gelombang laut itu akan membuat bandul-bandul yang ada di dalamnya ikut bergoyang seperti lonceng. Gerakan bandul tersebut yang akan ditransmisikan menjadi gerakan putar untuk memutar dinamo. Dari situlah selanjutnya PLTGL-SB dapat menghasilkan listrik.



Gambar. 1. Ilustrasi PLTGL-SB Zamrisyaf SY[2]

Gerakan ponton datar cenderung acak atau tidak beraturan diakibatkan oleh datangnya gelombang laut yang menggangukannya dan tidak beraturan pula. Pergerakan ponton datar yang acak ini mempengaruhi perputaran bandul yang berada di atasnya.

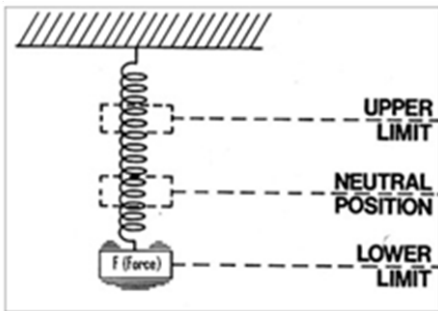
B. Konsep Getaran dan Bandul

Pengertian Getaran

Getaran adalah gerakan periodik dari sebuah benda atau sistem benda-benda yang berhubungan yang dipindahkan dari sebuah posisi kesetimbangan. Secara umum, ada dua jenis getaran, bebas dan paksa[5].

Getaran bebas terjadi bila gerakan dipertahankan oleh gaya gravitasi atau gaya pemulih elastis, seperti misalnya gerakan mengayun sebuah bandul atau getaran barang elastis. Atau dengan kata lain sistem berosilasi karena bekerjanya gaya-gaya yang ada di dalam sistem itu sendiri (*inherent*) dan jika tidak ada gaya luar yang bekerja. Getaran paksa disebabkan gaya periodik eksternal atau gaya intermitten yang diberikan pada sistem. Dengan kata lain, sistem berosilasi karena rangsangan gaya luar dan dipaksa untuk bergetar pada frekuensi rangsangan. Jika frekuensi rangsangan sama dengan salah satu frekuensi natural sistem, maka akan didapat keadaan resonansi, dan osilasi besar yang berbahaya mungkin terjadi.

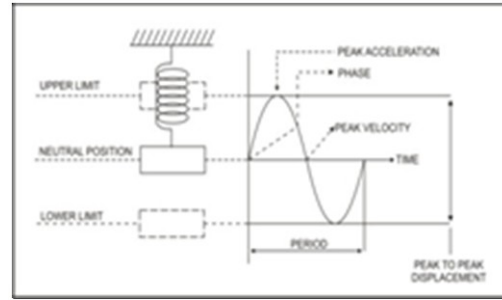
Ilustrasi sederhana untuk menjelaskan getaran adalah melalui sistem pegas yang diberikan beban pada ujungnya, seperti pada gambar berikut ini.



Gambar. 2. Ilustrasi getaran melalui mekanisme pegas dengan beban di ujungnya[5]

Apabila tidak ada gaya yang diberikan pada beban di ujung pegas, maka dapat dikatakan bahwa tidak ada getaran dan posisi beban berada pada keadaan kesetimbangan. Dengan memberikan gaya ke atas pada beban maka akan menyebabkan kompresi pada pegas yang akan membalik gerak beban ke bawah sehingga terjadi getaran. Selanjutnya, apabila gaya pada beban tersebut dilepaskan maka beban tersebut akan bergerak ke bawah melewati posisi

kesetimbangan sampai pada suatu titik gerakan pegas tersebut berhenti[6].



Gambar. 3. Plot sinyal getaran terhadap waktu[5]

Karakteristik Getaran

Setiap kondisi getaran benda memiliki karakteristik getaran. Karakteristik getaran yang dimaksud adalah:

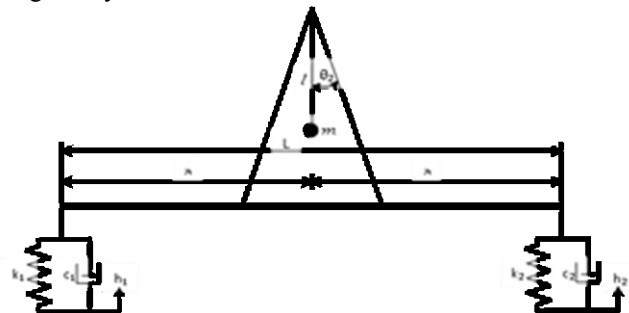
- Frekuensi
- Periode
- *Displacement*
- *Velocity*
- Akselerasi
- Fase

Mengacu pada contoh beban pada ujung pegas, dapat digambarkan karakteristik dari getaran dengan memplotkan gerakan beban terhadap waktu seperti pada gambar.

Gerakan pada gambar memiliki semua karakteristik yang dibutuhkan untuk menggambarkan getaran yang terjadi.

C. Pemodelan Matematis Sistem

Pemodelan sistem bandul merupakan pemodelan dengan tiga derajat kebebasan untuk menganalisa respon getaran pada sistem bandul-ponton yang sebenarnya memiliki bentuk lebih kompleks. Penelitian ini hanya meneliti tentang pengaruh massa dan panjang lengan bandul terhadap respon bandul sehingga disederhanakan dengan memodelkan ponton datar sebagai benda berupa batang dengan bandul matematis menggantung di atasnya. Berikut *free body* diagram nya.



Gambar. 4. Pemodelan sistem bandul

Persamaan matematis model sistem bandul sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 M \frac{d^2}{dt^2} y(t) - k_1 h_2(t) + (k_1 + k_2) y(t) + (k_1 + k_2) a \theta_1(t) + \\
 mgl \theta_1(t) - c_1 \frac{d}{dt} h_1(t) - c_2 \frac{d}{dt} h_2(t) + (c_1 + c_2) \frac{d}{dt} y(t) + \\
 (c_1 - c_2) a \frac{d}{dt} \theta_1(t) = 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

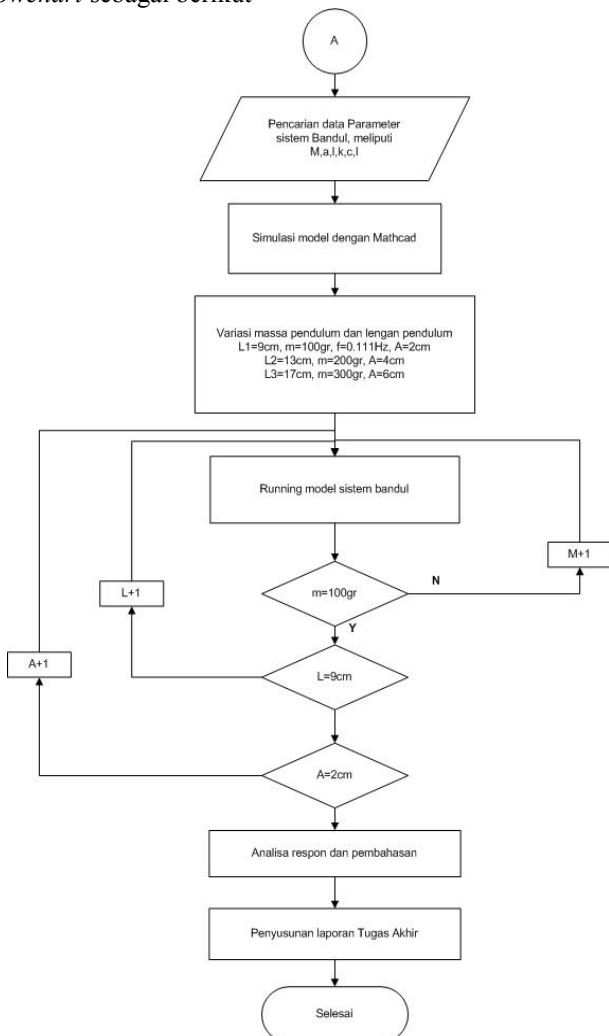
$$\begin{aligned}
 &(I + ml^2) \frac{d^2}{dt^2} \theta_1(t) - (k_1 h_1(t) - k_2 h_2(t))a + (k_1 - k_2)ay(t) \\
 &(k_1 + k_2)a^2 \theta_1(t) + mgl\theta_1(t) - (c_1 \frac{d}{dt} h_1(t) - c_2 \frac{d}{dt} h_2(t))a + \\
 &(c_1 - c_2)a \frac{d}{dt} y(t) + (c_1 + c_2)a^2 \frac{d}{dt} \theta_1(t) = 0 \tag{2} \\
 \\
 &ml^2 \frac{d^2}{dt^2} \theta_1(t) + ak_2[h_2(t) - (y - a\theta_1(t))] + mgl\theta_1(t) - \\
 &a(c_1 \frac{d}{dt} h_1(t) - c_2 \frac{d}{dt} h_2(t)) + (c_1 - c_2)a \frac{d}{dt} y(t) + \\
 &(c_1 + c_2)a^2 \frac{d}{dt} \theta_1(t) = 0 \tag{3}
 \end{aligned}$$

Persamaan 1, 2 dan 3 menggambarkan respon sistem utama yakni *heave* (y), *pitch* (θ_1) dan osilasi bandul θ_2 . Dimana M adalah massa ponton, k_1 dan k_2 adalah konstanta redaman air, c_1 dan c_2 merupakan redaman air laut, a merupakan jarak pusat massa ke ujung batang ponton, l merupakan panjang lengan bandul, I merupakan momen inersia sistem arah *pitch*, sedangkan h_1 dan h_2 adalah gaya pengganggu dari air.

III. METODOLOGI

A. Prosedur Penelitian

Prosedur Penelitian secara garis besar dapat dilihat dari *flowchart* sebagai berikut



Gambar. 5. Pemodelan sistem bandul

B. Penjelasan Flowchart Penelitian

Keterangan Flowchart Penelitian

1. Studi literatur

Mencari dan mempelajari berbagai literatur seperti buku, jurnal, untuk bisa mendapatkan informasi maupun data-data yang berkaitan dengan getaran, sistem bandul, osilasi, gerak harmonik, *statespace*.

2. Pemodelan matematis sistem bandul

Pada tahap ini dilakukan pemodelan secara matematis dari sistem Bandul dengan pendekatan sistem dengan tiga derajat kebebasan yaitu antara y , θ_1 , θ_2 . Setelah mendapatkan modelnya kemudian dibuat dalam bentuk *statespace* dengan bantuan Mathcad 14.0.

3. Pencarian data parameter bandul

Pada tahap ini dilakukan pencarian maupun pengambilan data-data parameter yang diperlukan untuk bisa melakukan penelitian ini meliputi frekuensi, koefisien redaman, simpangan, dan momen inersia

4. Simulasi dan penentuan respon getaran

Pada tahap ini dilakukan simulasi dan *running* model sistem dengan variasi panjang lengan $L=9$ cm, $L=13$ cm, dan $L=17$ cm. dengan massa bandul, $M=100$ gr, $M=200$ gr, $M=300$ gr.

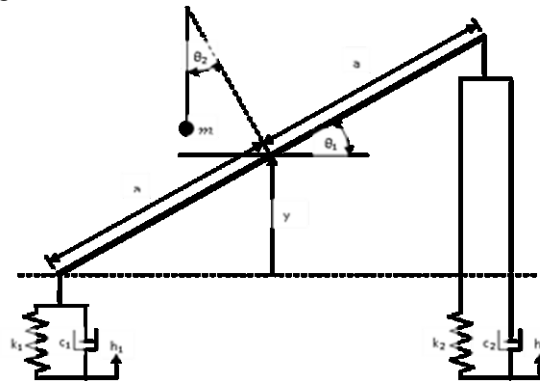
5. Analisa dan pembahasan

Pada tahap ini dilakukan analisa terhadap respon bandul sehingga dapat diketahui karakteristik dari sistem tersebut.

C. Perancangan Sistem Bandul untuk Simulasi model

Fokus utama pada bab ini adalah pemodelan sistem bandul. Tujuan dari pemodelan pada penelitian ini yaitu untuk menentukan representasi model matematis sistem dalam bentuk fungsi ruang keadaan (*state space*). Model dinamika sistem dideskripsikan sebagai hubungan antara input dan output, yang memungkinkan untuk memahami perilaku sistem.

Rancangan model sistem bandul dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar. 6. *free body diagram* sistem bandul (asumsi jika ponton dikenai gelombang air)

Gambar tersebut merupakan asumsi olakan ponton ketika dihempas gelombang, ketika terkena gelombang, maka ponton akan bergerak naik turun dan melakukan gerakan *pitch* (gerakan rotasi kearah sumbu y) digambarkan dengan derajat kebebasan θ_1 . Kemudian selain *pitch*, ponton juga melakukan gerakan *heave* (gerakan translasi kearah sumbu z) digambarkan dengan derajat kebebasan y , serta ayunan bandul yang digambarkan dengan derajat kebebasan θ_2 .

Data parameter yang digunakan dalam simulasi ini diperoleh dari literatur dan jurnal terkait serta dari penelitian sebelumnya adalah sebagai berikut:

Tabel 1.
Data parameter

Parameter	definisi	Nilai
k	Konstanta redaman	0.075N/m
c	Redaman air laut	0.0015Ns/m
M	Massa ponton	0.5 kg
I	Momen inersia	6x10 ⁻³ N
g	gravitasi	10 m/s ²

D. Statespace untuk Mencari Respon

Hasil dari permisalan y akan diperoleh nilai A(t), B(t), dan u(t). Parameter yang mendukung dalam state space antara lain adalah waktu awal, waktu akhir, keadaan awal, dan jumlah grid waktu.

$$A(t) := \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix}$$

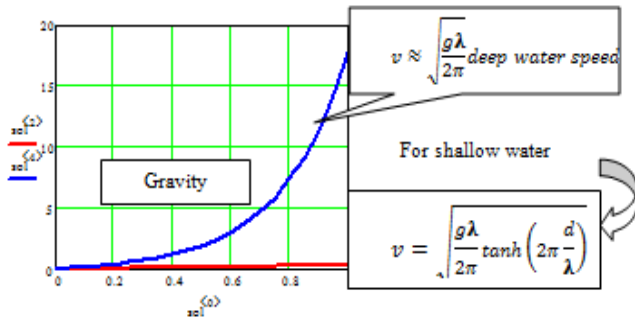
$$A(t) := \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{k_1 + k_2}{M} & \frac{c_1 + c_2}{M} & \frac{(k_1 - k_2)a + m \cdot g \cdot l}{M} & \frac{c_1 - c_2}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{(k_1 - k_2) \cdot a}{(I + M \cdot l^2)} & \frac{(c_1 - c_2) \cdot a}{(I + M \cdot l^2)} & \frac{(k_1 + k_2) \cdot a^2 + m \cdot g \cdot l}{(I + M \cdot l^2)} & \frac{(c_1 + c_2) \cdot a^2}{(I + M \cdot l^2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B(t) := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$u(t) := \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_1 \cdot h_1(t) + k_2 \cdot h_2(t)}{M} \\ 0 \\ \frac{a \cdot k_1 \cdot h_1(t) - a \cdot k_2 \cdot h_2(t)}{(I + M \cdot l^2)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

IV. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

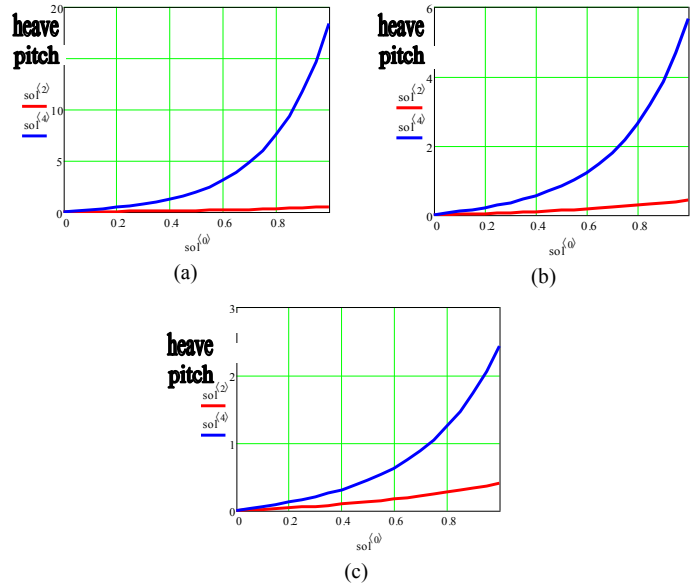
A. Analisa dan Pembahasan pada amplitudo 2 cm dengan variasi massa 100 gr dan panjang lengan bandul 9,13, 17cm



Gambar. 7. keluaran mathcad berupa garis merah merupakan kecepatan gerakan heave (y) dan garis biru merupakan gerakan pitch (θ) pada massa 100 gr panjang lengan 9 cm dan amplitudo 2 cm

Semua deskripsi gelombang di atas berlaku untuk jangka panjang gelombang yang disebut "gelombang gravitasi",

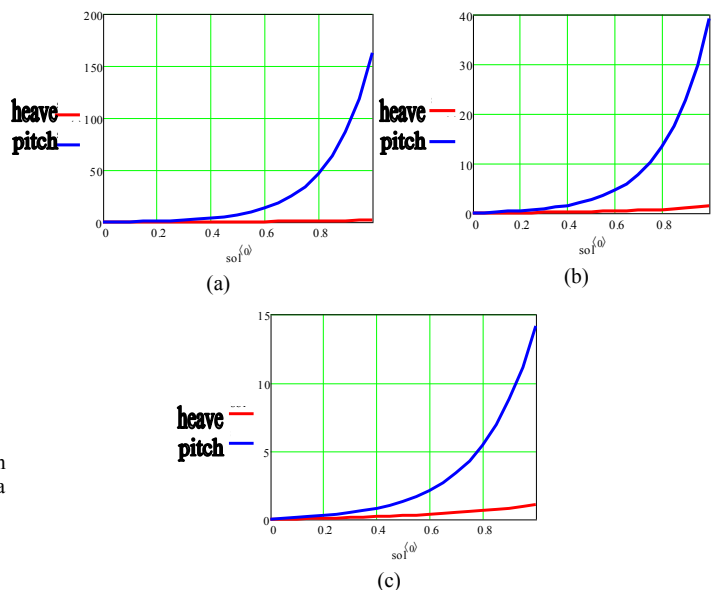
menyiratkan bahwa gelombang tersebut dikendalikan oleh gravitasi dan inersia. Kecepatan gelombangnya meningkat sesuai dengan meningkatnya panjang gelombang, perilaku yang disebut "dispersi normal". Untuk gelombang lebih pendek dari 0.6 cm, tegangan permukaan air memberikan gaya pengendali yang disebut "gelombang kapiler". Kecepatan gelombangnya pun meningkat tetapi panjang gelombang menjadi lebih pendek, perilaku yang disebut "dispersi anomali". Kecepatan gelombang minimum pada panjang gelombang 0.6 cm adalah 3,5 m / s.



Gambar. 8. keluaran mathcad berupa respon (a) pada massa 100 gr lengan 9 cm (b) pada massa 100 gr lengan 13 cm (c) pada massa 100 gr lengan 17 cm

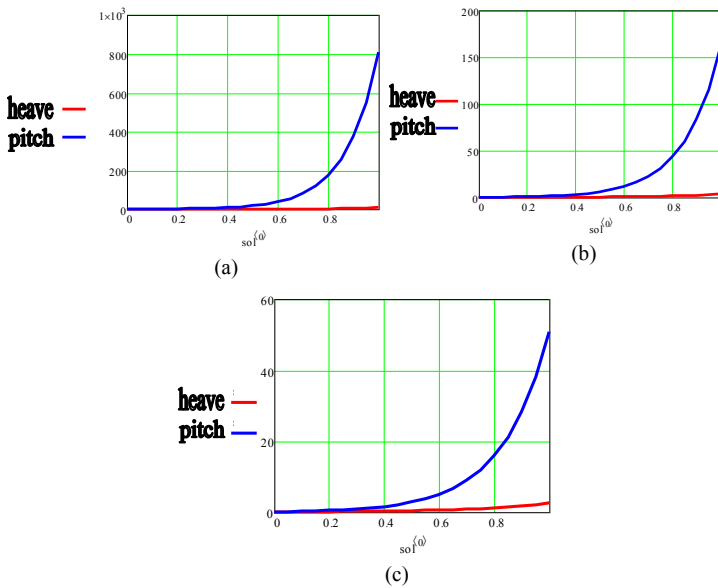
Pada sebagian besar grafik respon θ(t), dapat dilihat bahwa grafik bergerak naik terus hingga titik tertentu sampai waktu selesai. Nilai grafik θ(t) yang terus naik ini menandakan bandul bergerak kearah yang sama. Jika respon θ(t) melebihi sudut awal berarti bandul sudah mencapai satu putaran. Hal ini dapat terjadi karena bandul sudah melewati posisi kesetimbangannya sebelum posisi kesetimbangan berubah.

B. Analisa dan Pembahasan pada amplitudo 4 cm dengan variasi massa 200 gr dan panjang lengan bandul 9,13, 17cm



Gambar. 9. keluaran mathcad berupa respon (a) pada massa 200 gr lengan 9 cm (b) pada massa 100 gr lengan 13 cm (c) pada massa 100 gr lengan 17 cm

C. Analisa dan Pembahasan pada amplitude 6 cm dengan variasi massa 300 gr dan panjang lengan bandul 9,13, 17cm



Gambar. 10. keluaran *mathcad* berupa respon (a) pada massa 300 gr lengan 9 cm (b) pada massa 100 gr lengan 13 cm (c) pada massa 100 gr lengan 17 cm

D. Analisa Umum Respon Bandul

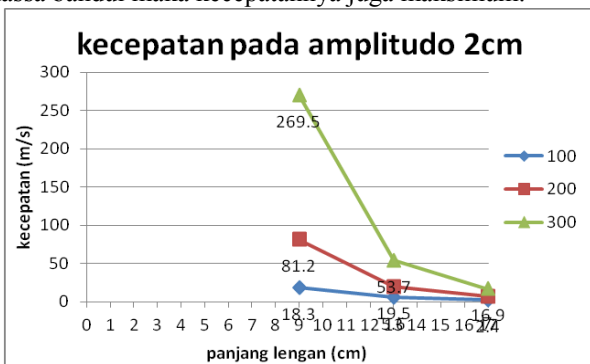
• Pada Amplitudo 2 cm

Tabel 2.

Kecepatan gerak pada amplitude 2 cm

Massa (gr)	Panjang lengan (cm)	Kecepatan (m/s)
100	9	$18,3 \times 10^{-3}$
	13	$5,6 \times 10^{-3}$
	17	$2,4 \times 10^{-3}$
200	9	$81,2 \times 10^{-3}$
	13	$19,5 \times 10^{-3}$
	17	$7,0 \times 10^{-3}$
300	9	$269,5 \times 10^{-3}$
	13	$53,7 \times 10^{-3}$
	17	$16,9 \times 10^{-3}$

Dapat dilihat bahwa kecepatan maksimum pada panjang lengan 9 cm dan massa bandul 300 gr. Diperoleh nilai kecepatan $269,5 \times 10^{-3}$ m/s sedangkan kecepatan terendah yaitu pada panjang lengan 17 cm dan massa bandul 100 gr, diperoleh nilai kecepatan sebesar $2,4 \times 10^{-3}$ m/s. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin pendek lengan bandul, maka semakin tinggi kecepatan bandul dan dengan semakin besar massa bandul maka kecepatannya juga maksimum.



Gambar. 11. Kecepatan gerak pada amplitude 2 cm dengan variasi massa dan panjang lengan bandul

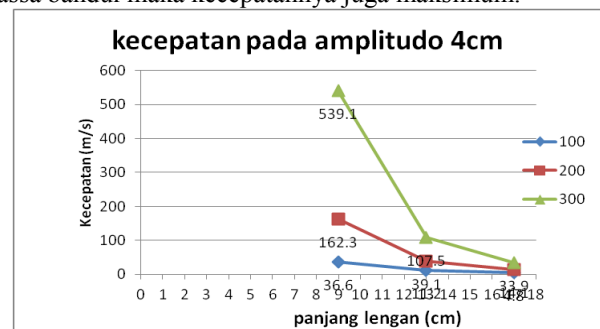
• Pada Amplitudo 4 cm

Tabel 3.

Kecepatan gerak pada amplitude 4 cm

Massa (gr)	Panjang lengan (cm)	Kecepatan (m/s)
100	9	$36,6 \times 10^{-3}$
	13	$11,2 \times 10^{-3}$
	17	$4,8 \times 10^{-3}$
200	9	$162,3 \times 10^{-3}$
	13	$39,1 \times 10^{-3}$
	17	$14,1 \times 10^{-3}$
300	9	$539,1 \times 10^{-3}$
	13	$107,5 \times 10^{-3}$
	17	$16,9 \times 10^{-3}$

Dapat dilihat bahwa kecepatan maksimum pada panjang lengan 9 cm dan massa bandul 300 gr. Diperoleh nilai kecepatan $539,1 \times 10^{-3}$ m/s sedangkan kecepatan terendah yaitu pada panjang lengan 17 cm dan massa bandul 100 gr, diperoleh nilai kecepatan sebesar $4,8 \times 10^{-3}$ m/s. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin pendek lengan bandul, maka semakin tinggi kecepatan bandul dan dengan semakin besar massa bandul maka kecepatannya juga maksimum.



Gambar. 12. Kecepatan gerak pada amplitude 4 cm dengan variasi massa dan panjang lengan bandul

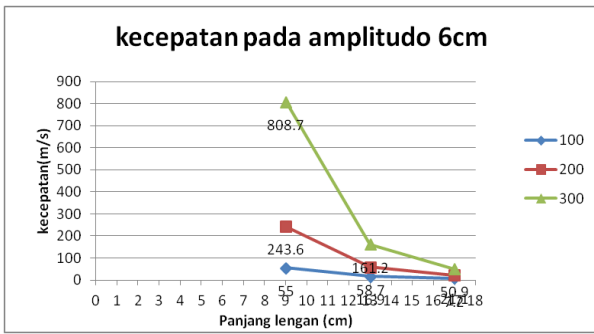
• Pada Amplitudo 6

Tabel 4.

Kecepatan gerak pada amplitude 6 cm

Massa (gr)	Panjang lengan (cm)	Kecepatan (m/s)
100	9	$55,0 \times 10^{-3}$
	13	$16,9 \times 10^{-3}$
	17	$7,2 \times 10^{-3}$
200	9	$243,6 \times 10^{-3}$
	13	$58,7 \times 10^{-3}$
	17	$21,1 \times 10^{-3}$
300	9	$808,7 \times 10^{-3}$
	13	$161,2 \times 10^{-3}$
	17	$50,9 \times 10^{-3}$

Dapat dilihat bahwa kecepatan maksimum pada panjang lengan 9 cm dan massa bandul 300 gr. Diperoleh nilai kecepatan $808,7 \times 10^{-3}$ m/s sedangkan kecepatan terendah yaitu pada panjang lengan 17 cm dan massa bandul 100 gr, diperoleh nilai kecepatan sebesar $7,2 \times 10^{-3}$ m/s. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin pendek panjang bandul, maka semakin tinggi kecepatan bandul dan dengan semakin besar massa bandul maka kecepatannya juga maksimum.



Gambar. 13. Kecepatan gerak pada amplitudo 6 cm dengan variasi massa dan panjang lengan bandul

Semakin pendek panjang lengan bandul maka semakin tinggi kecepatan bandul disebabkan oleh jarak tempuh linear yang dibutuhkan massa untuk melakukan satu putaran penuh lebih pendek dibandingkan jika panjang lengan bandul lebih besar. Semakin tinggi peningkatan kecepatan bandul pada frekuensi yang semakin tinggi di permulaan gerak dipengaruhi oleh kecepatan lempeng ponton datar untuk semakin miring. Semakin tinggi frekuensi maka semakin cepat lempeng ponton datar miring. Semakin miring lempeng ponton datar maka semakin mudah bandul untuk bergerak atau semakin tinggi peningkatan kecepatan putar bandul.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Model matematis getaran Bandul Matematis diatas sebuah ponton merupakan persamaan diferensial simultan orde 2.
2. Parameter bandul yang paling sesuai dengan variasi massa dan lengan bandul adalah dengan massa 300 gr dan lengan 9 cm. Parameter ini dipilih berdasarkan hasil simulasi yang menyatakan bahwa semakin pendek panjang bandul, maka semakin tinggi kecepatan bandul dan dengan semakin besar massa bandul maka kecepataannya juga maksimum.
3. Nilai kecepatan tertinggi didapatkan pada amplitude 6cm dengan panjang lengan bandul 9cm dan massa bandul 300gr yaitu sebesar $808,7 \times 10^{-3}$ m/s dan kecepatan minimum didapatkan pada panjang lengan bandul 17cm dan massa bandul 100gr pada amplitude 2cm sebesar $2,4 \times 10^{-3}$ m/s.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis E.N mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan finansial melalui beasiswa PPA-BBM tahun 2012 dan BPOPTN.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Agus R. Utomo, Linda Pasaribu dan Wike Handini. " *Studi Penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Dengan Penggerak Bandul Di Lautan Kepulauan Mentawai Sumatera Barat*". Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi-II 2008 Universitas Lampung, 17-18 November 2008. (2008)

[2] Balitbang Ketenagalistrkan PLN dan LPPM ITS,"*Studi Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut-Sistem Bandulan (PLTGL-SB)*," Surabaya: ITS (2010).

[3] Noerpamungkas. Ardi, Harus Laksana Guntur.. " *Pemodelan dan Simulasi Respon Bandul Akibat Eksitasi Harmonik Pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut Sistem Bandul – Ponton Datar*". Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember. (2011)

[4] Chamelia, D. *Analisis Vibrasi Subsea Pipeline Akibat Aliran Internal Dan Eksternal Di Sisi Nubi Field Total E&P Indonesia*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember. (2009)

[5] D. Dimargonas, Andrew, " *Vibration for Engineers*", Prentice Hall PTR, New jersey, (2002).

[6] Craig Jr., Roy R.. *Structural Dynamic An Introduction to Computer Methods*. Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics in The University of Texas. Austin. (1981).