

Kajian Karakteristik Gerakan Kapal Catamaran Dalam Variasi Arah Propagasi Gelombang Dengan Pendekatan *Linear Strip Theory Method*

Sumardiono^{1*}, Ruddianto¹, Rachmad Tri Soelistijono¹

¹Program Studi Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia
sumardiono@ppns.ac.id

Abstrak— Perubahan arah propagasi gelombang dan kecepatan laju kapal akan memberikan perbedaan magnifikasi pada intensitas respon gerakannya. Pada kondisi kapal sedang bergerak melaju di atas gelombang dengan kecepatan tertentu, nakhkoda akan dapat melakukan manuver untuk mengarahkan kapalnya ke sisi relatif terhadap gelombang. Manuver seperti ini diharapkan akan dapat mengurangi intensitas gerakan kapalnya. Maka untuk dapat menentukan langkah yang tepat dalam bermanuver, sangat diperlukan adanya informasi mengenai karakteristik gerakan kapal dalam beberapa kecepatan (yang ditunjukkan dengan angka *froude*) dan variasi propagasi gelombang (yang ditunjukkan dengan sudut datang gelombang). Kajian dilakukan melalui analisis numerik terhadap kapal lambung ganda (*catamaran*) dengan bantuan piranti lunak yang relevan dan menggunakan pendekatan *linear strip theory method*. Sudut datang gelombang bervariasi antara 0 derajat sampai 180 derajat dengan interval kenaikan sebesar 15 derajat. Dari kurva *Response Amplitude Operator* (RAO) yang dihasilkan memberikan informasi bahwa gerakan pitch terbesar terjadi pada kondisi gelombang head sea sebesar 2,881 deg/deg. Sedangkan kondisi beam sea memberikan magnifikasi terbesar untuk gerakan heave dan roll berturut-turut sebesar 2,651 m/m dan 2,969 deg/deg. Penurunan respon gerakan sebesar 52,39%, 47,36% dan 3,29% dapat dicapai apabila kapal melakukan manuver dengan pengurangan sudut sebesar 15 derajat relatif terhadap arah datang gelombang untuk gerakan heave, roll dan pitch.

Keywords— *katamaran; linear strip theory method; respon gerakan; propagasi gelombang; RAO*

I. PENDAHULUAN

Pertimbangan para desainer dalam melakukan pekerjaan perancangan kapal diawali dengan mendesain bentuk lambungnya. Bentuk lambung yang optimal adalah bentuk lambung yang memenuhi aspek-aspek ideal dalam menunjang performa kapal. Yang paling dapat digunakan sebagai contoh

adalah mengenai pengaruh bentuk lambung kapal terhadap kecepatan kapal dan daya mesin yang dibutuhkan. Bentuk lambung yang ramping, dengan luas permukaan yang minimal, akan meningkatkan kemampuan kapal dalam melaju di perairan pada saat operasional dengan daya mesin yang sama dengan dengan bentuk lambung lain yang memiliki koefisien blok yang lebih besar. Keunggulan koefisien blok yang kecil ini tidak berarti menjadi kelebihan dalam aspek yang lain, terutama dalam aspek stabilitas melintang dan kemampuan meminimalisir periode oleng kapal tersebut.

Kontradiksi antara aspek kecepatan dan daya mesin dengan kemampuan stabilitas dan periode oleng memberikan pekerjaan tersendiri bagi desainer kapal untuk memutuskan desain akhir yang optimal. Akan sangat merugikan apabila sebuah kapal sangat unggul di satu aspek namun memberikan kelemahan di beberapa aspek yang lain. Maka perkembangan ide-ide mengenai bentuk lambung kapal berjalan sangat pesat seiring dengan kemajuan teknologi untuk menggantikan bentuk lambung kapal konvensional dalam lambung tunggal *monohull*, diantaranya bentuk lambung banyak atau *multi hull* diantaranya lambung ganda (*katamaran*), lambung tiga (*trimaran*) dan *Small Water-plane Area Twin-Hulled (SWATH)*. Kapal *katamaran* merupakan kapal *multi-hull* dengan dua buah lambung *demihull* yang terisolasi oleh *bridging deck*. Kapal ini mempunyai karakteristik yang unik yaitu luasan geladak yang lebih besar, stabilitas melintang yang lebih baik dan hambatan yang lebih kecil [1].

Uraian yang dikemukakan di atas menjadi dasar dalam melakukan sebuah kajian numerik yang akan memberikan perkiraan atau prediksi mengenai karakteristik gerakan kapal *catamaran* akibat beban gelombang reguler/sinusoidal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana kapal *catamaran* memberikan respon berupa gerakan terhadap beban



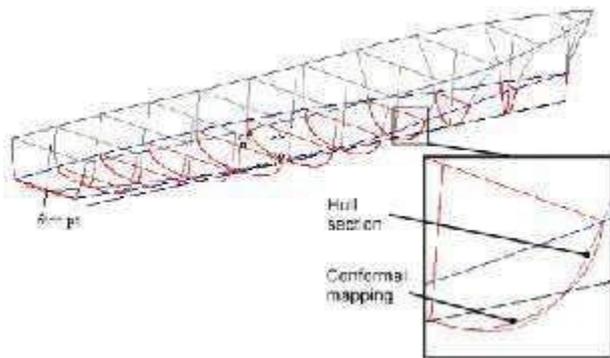
eksitasi gelombang reguler. Luaran yang diharapkan adalah berupa informasi awal gerakan kapal yang pada tahapan selanjutnya akan bisa digunakan untuk benar-benar merepresentasikan gerakan kapal di perairan yang riil [2]. Dengan demikian apabila didapatkan gerakan kapal yang berlebihan akan dengan dini dapat diambil langkah untuk menghindarinya, salah satunya adalah kesiapan nahkodadalam membuat keputusan melakukan manuver kapal untuk mengarahkannya ke sisi lain terhadap arah propagasigelombang yang menghasilkan respon gerakan yang lebih kecil.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Teori Lempengan Linear

Pada teori linear strip dalam memprediksi karakteristik hidrodinamika terhadap suatu kapal atau benda apung adalah menggunakan teori aliran fluida potensial [3]. Yang mana kapal dianggap rigid body yang mengapung pada fluida ideal; homogen, incompressible, free surface tension, irrotasional dan non viscous. Dalam teori strip kapal dibagi dalam suatu strip- strip dua dimensi yang disebut conformal mapping (Gambar 1) dan dari sini dilakukan perhitungan koefisien hidrodinamisnya.

Teori strip ini dalam menyelesaikan permasalahan tiga dimensi badan kapal untuk gaya-gaya hidrodinamika, exciting force dan momen diintegrasikan dari penyelesaian potensial dua dimensinya sepanjang kapal. Jadi tiap cross section body kapal tersebut dianggap sebagai bagian suatu silinder panjang. Dengan asumsi ini maka gerakan badan kapal tersebut linier atau dapat dilinierkan.



Gambar. 1. Integrasi Gaya Gelombang berdasarkan Teori Lempengan

B. Gerakan Kapal

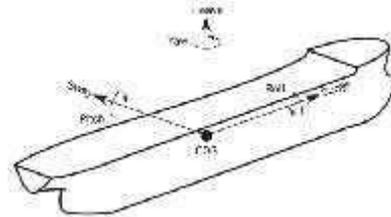
Gerakan bangunan apung akibat eksitasi gelombang terdiri dari 6-derajat kebebasan, yaitu surge, sway, heave, roll, pitch dan yaw. Keenam gerakan tersebut adalah merupakan gerakan linier dan harmonik [4]. Gerakan-gerakan ini dapat dinyatakan dalam persamaan diferensial. Gerakan kopelnya dalam enam derajat kebebasan, yang ditunjukkan pada Gambar 2 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\zeta_{jk} + B_{jk}\dot{\zeta}_{jk} + K_{jk}\zeta_{jk}] = F_j e^{i\omega t} \quad (1)$$

dimana:

M_{jk} = matriks massa dan momen inersia massa

- A_{jk} = matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik
- B_{jk} = matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik
- K_{jk} = matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatis
- F_j = matriks gaya eksitasi dan momen eksitasi dalam fungsi kompleks
- ζ = elevasigerakan
- $\dot{\zeta}$ = elevasi kecepatan gerak
- $\ddot{\zeta}$ = elevasi percepatan gerak



Gambar. 2. 6-derajat Gerakan Kapal

Persamaan (1) menunjukkan hubungan antara gaya aksi di ruas kanan dan gaya reaksi di ruas kiri. Gaya aksi adalah merupakan eksitasi gelombang, sedangkan gaya reaksinya terdiri dari gaya inersia, gaya redaman dan gaya pengembali, yang masing-masing berkorelasi dengan percepatan gerak, kecepatan gerak dan simpangan atau displasemen gerakan.

C. Karakteristik Gerakan di Gelombang Reguler

Informasi tentang karakteristik gerakan pada umumnya disajikan dalam bentuk grafik, di mana absisnya adalah berupa parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya merupakan rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu (ζ_0) dengan amplitudo gelombang (ζ) yang dikenal sebagai Response Amplitude Operator (RAO).

Respons gerakan RAO, untuk gerakan translasi, yaitu surge, sway dan heave adalah merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakannya dibanding dengan amplitudo gelombang insiden (keduanya dalam satuan panjang):

$$RAO = \frac{\zeta_0}{\zeta} \quad (\text{m/m}) \quad (2)$$

Sedangkan respons non-dimensi atau RAO untuk gerakan rotasi, yaitu roll, pitch dan yaw adalah merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yang merupakan perkalianantara angka gelombang dengan amplitudo gelombang insiden:

$$RAO = \frac{\zeta_0}{k\zeta} \quad (\text{deg/deg}) \quad (3)$$

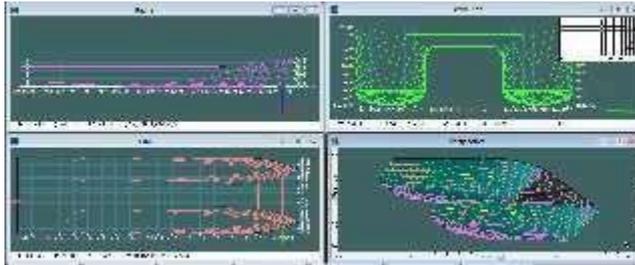
Arah gelombang (θ) didefinisikan sebagai sudut antara arah propagasi gelombang dengan arah laju kapal. Arah gelombang θ sebesar 0° ditetapkan bila arah propagasi gelombang adalah sama dengan arah melajunya kapal. Sebaliknya bila arah gelombang berlawanan dengan arah laju kapal maka ditetapkan $\theta=180^\circ$. Mengikuti kedua definisi tersebut kemudian ditetapkan bahwa sudut gelombang 90° dan 270° adalah apabila gelombang datang dari arah sisi-sisi kapal yaitu starboard dan portside.



Lebih lanjut istilah yang lazim digunakan untuk menjelaskan arah gelombang datang adalah *following sea* untuk gelombang buritan, *beam sea* untuk gelombang sisi dan *head sea* untuk gelombang haluan.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Kajian karakteristik gerakan kapal dititikberatkan pada membandingkan hasil yang diperoleh dengan bentuk lambung konvensional *monohull*. Bentuk lambung ganda catamaran diperoleh dari sample design yang terdapat pada instalasi perangkat lunak Maxsurf [5]. Seperti pada lazimnya, bentuk lambung direpresentasikan dengan gambar rencana garis (*lines plan*) yang terdiri atas 2 potongan lambung kapal berupa *sheer plan*, *body plan* dan *half breadth plan*.



Gambar. 3. Rencana Garis Pemodelan Kapal

Komputasi performa kapal yang dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak memberikan kemungkinan akan tidak valid-nya model 3 dimensi yang dibangun. Atas dasar ini dalam setiap analisis numerik *direct calculation* perlu dilakukan proses validasi model. Kajian karakteristik gerakan kapal memerlukan validasi yang ditempuh dengan jalan melakukan *generate* untuk *hydrostatic* properties-nya. Seperti disajikan pada Tabel I, di dalam properties ini akan dapat dilihat data yang dihasilkan yang menunjukkan parameter-parameter yang dimiliki kapal diantaranya luas permukaan basah, *displacement* dan koefisien- koefisien bentuk lambung kapal serta titik berat lambung yang tercelup air (LCB).

Operational Cases ditentukan berdasarkan 4 aspek yang berpengaruh terhadap respon gerakan kapal akibat gelombang reguler dalam bentuk RAO. Satu set *Operational Case* merupakan kombinasi antara masing-masing satu nilai kondisi muatan kapal, kecepatan kapal, jenis gerakan dan arah propagasi gelombang [6]. Untuk mendapatkan berapa jumlah grafik RAO yang nantinya akan dibahas maka variasi aspek tersebut sudah terlebih dahulu didefinisikan (Tabel II). Kondisi muatan dianggap dalam muatan penuh, kecepatan diambil kecepatan dinas, jenis gerakan diambil 3 gerakan yang merupakan gerakan osilasi yaitu *heave*, *pitch* dan *roll*. Arah datang gelombang diambil 13 variasi sudut diantara gelombang buritan dan gelombang haluan dengan *increment* sebesar 15 derajat.

TABLE I. PARAMETER HYDROSTATIK

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang Garis Air	39	m
Lebar	11	m
Luasan Permukaan Basah	453,5	m ²
Displacement	391,7	Ton
LCB (diukur dari midship)	-2,0	m

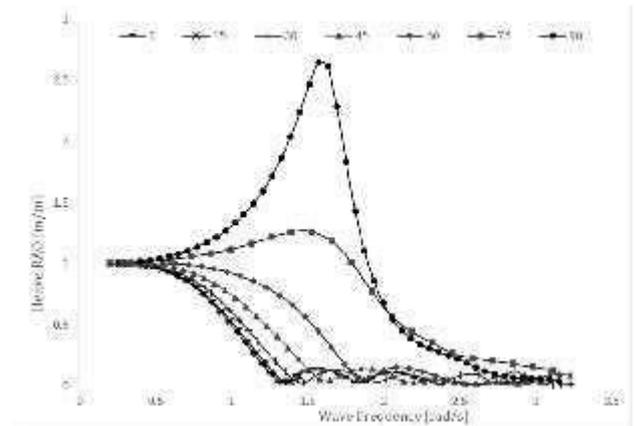
TABLE II. VARIASI KONDISI OPERASIONAL

Faktor	Jumlah	Rincian
Kondisi Pemuatan	1	Full Load
Kecepatan Kapal	1	12 knot
Jenis Gerakan	3	Heave; Roll dan Pitch
Arah Propagasi Gelombang	13	0° sampai 180°; interval 15°

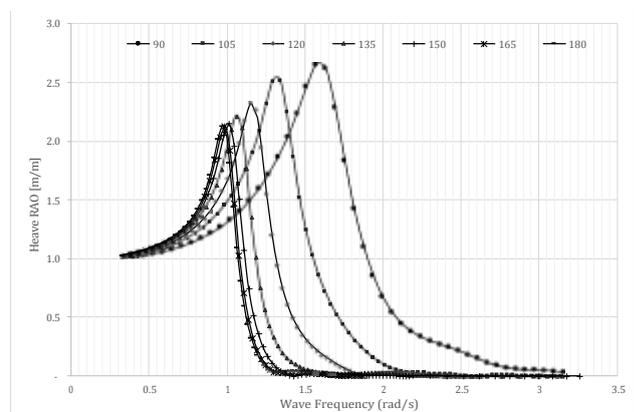
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sesuai dengan pendekatan yang tertera dalam judul, penelitian ini menggunakan metode linear teori *strip* dalam perhitungan gaya gelombangnya. Dalam tahap ini pula akan didefinisikan sebagai input perhitungan adalah berupa tipe kapal, jarak *demihull*, sarat dan trim, distribusi berat, faktor damping, rentang frekuensi dan diakhiri dengan melakukan *generate* untuk *measure hull*-nya.

Input-input yang telah didefinisikan sebelumnya baik perhitungan gaya gelombang maupun operational case menjadi dasar dalam melakukan *running* atau analisis respon gerakan kapal dalam bentuk *Response Amplitude Operator* (RAO). Spektrum respon tidak termasuk dalam lingkup penelitian ini, sehingga input berupa spektrum gelombang tidak perlu didefinisikan. Namun untuk *transom term*, *added resistance* dan *arbitrary wave force* akan dipilih berdasarkan pendekatan yang telah diasumsikan. Tahapan ini diakhiri dengan melakukan perhitungan mengenai *wave surface* dan *calculate RAO*.



Gambar. 4. RAO Heave Following-Beam Sea



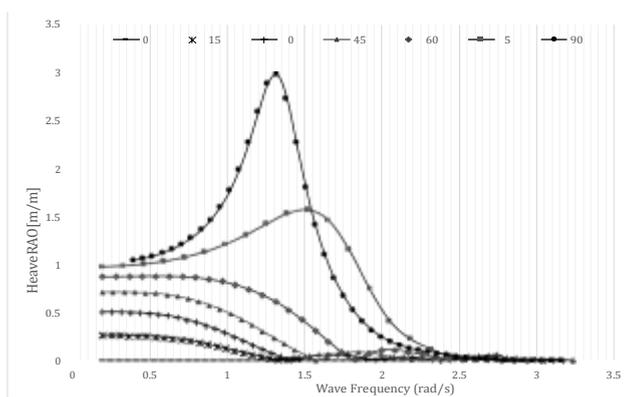
Gambar. 5. RAO Heave Beam-Head Sea



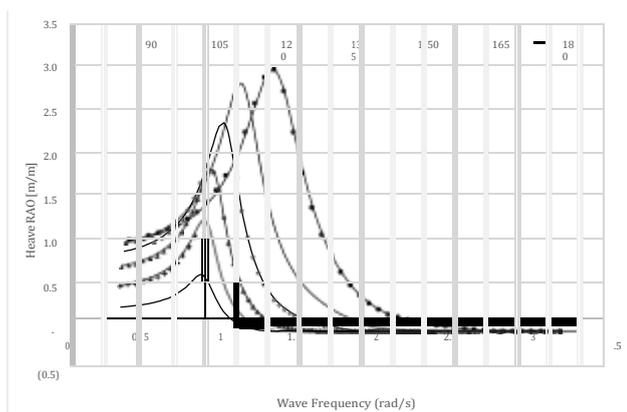
Respon gerakan *heave* akibat gelombang reguler pada katamaran disajikan pada Gambar 4 untuk kondisi gelombang *following sea* sampai *beam sea*, sedangkan kondisi *beam sea* sampai *head sea* pada Gambar 5.

Dari hasil RAO tersebut terlihat bahwa gerakan *heave* yang terbesar terjadi pada saat sudut gelombang 90° yaitu sebesar 2.651 m/m diikuti dengan sudut 105° dan 120° berturut-turut bernilai 2.523 m/m dan 2.323 m/m. Namun penurunan respon gerakan yang demikian ini terjadi pada frekuensi gelombang yang berbeda. Sehingga apabila ditinjau dari kondisi perairan yang riil dimana frekuensi gelombang tetap dalam satu kondisi, maka dapat diidentifikasi bahwa penurunan respon gerakan *heave* terbesar terjadi pada saat frekuensi gelombang 1.57 rad/s sebesar 61,03%. Karakteristik gerakan ini memberikan informasi bahwa dengan perubahan sudut sebesar 15 derajat dari kondisi *beam sea* menuju sudut 105 derajat berakibat pada perubahan yang signifikan terhadap respon gerakan *heave* kapal katamaran. Pada frekuensi ini, nilai respon gerakan *heave* terkecil terjadi pada saat kondisi *head sea* sebesar 0,025 m/m.

Karakteristik yang sama dialami kapal untuk gerakan *roll* yang ditunjukkan oleh RAO *Roll* seperti tersaji pada Gambar 6 dan Gambar 7. Dari semua variasi arah propagasi gelombang, respon terbesar terjadi pada saat kondisi *beam sea*, sudut 105 derajat dan sudut 120 derajat sebesar 2,969 derajat, 2,814 derajat dan 2,361 derajat.



Gambar. 6. RAO Roll Following-Beam Sea



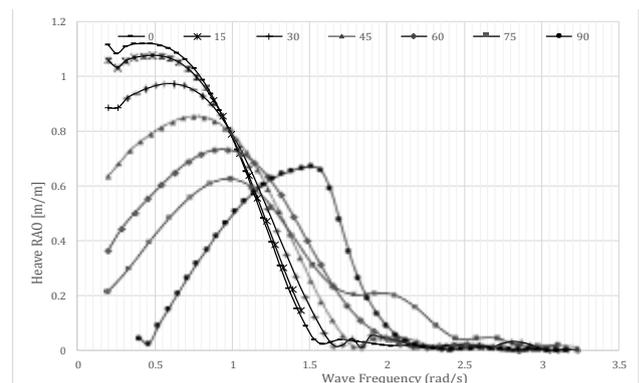
Gambar. 7. RAO Roll Beam-Head Sea

Dengan mengacu pada nilai frekuensi gelombang pada saat gerakan *roll* terbesar, 1,32 rad/s, diperoleh prosentase penurunan respon gerakan terbesar terjadi pada perubahan sudut datang paling dekat dari kondisi *beam sea* menuju ke 75 derajat dan 105 derajat masing-masing sebesar 52,25% dan 53,53%.

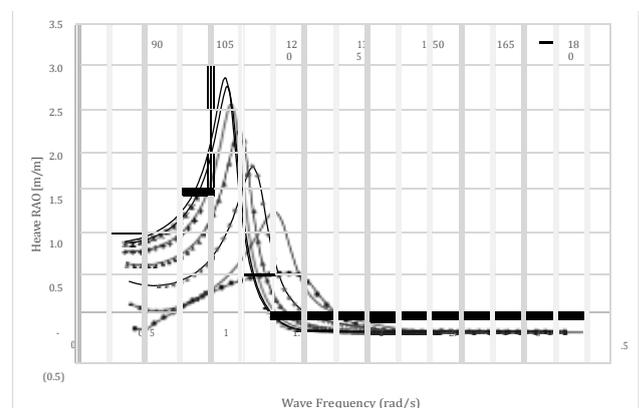
Respon gerakan *pitch* berdasarkan pengkategorian kondisi gelombang *following sea* sampai *beam sea* (Gambar 8) dan kondisi *beam sea* sampai *head sea* (Gambar 9), menunjukkan bahwa magnifikasi terbesar terjadi pada kategori kedua, lebih tepatnya pada saat sudut gelombang 180 derajat (*head sea*) sebesar 2,881 deg/deg.

Penurunan RAO untuk perubahan sudut terdekat ke arah 165 derajat dan 150 derajat masih sebesar 2,786 deg. dan 2,576 deg. Nilai ini masih relatif lebih besar dibandingkan dengan respon maksimal yang terjadi pada kategori kondisi gelombang yang pertama dimana nilai terbesar terjadi pada sudut 0° sebesar 1,12 deg. Hal ini memberikan informasi mengenai karakteristik kapal katamaran bahwa potensi yang riskan terhadap gerakan kapal katamaran apabila kondisi gelombang cenderung datang dari arah haluan kapal atau berlawanan dengan arah laju kapal.

Keseluruhan respon gerakan kapal katamaran berdasarkan jenis gerakan yang ditinjau yakni *heave*, *roll* dan *pitch* disajikan pada Gambar 10 untuk semua variasi arah propagasi gelombang. Pada kondisi gelombang *head sea* (180°), respon gerakan terbesar adalah gerakan *pitch* sebesar 2,88 derajat, diikuti dengan gerakan *heave* sebesar 2,13 meter dan terkecil adalah *roll* hampir tidak terdigerakan.



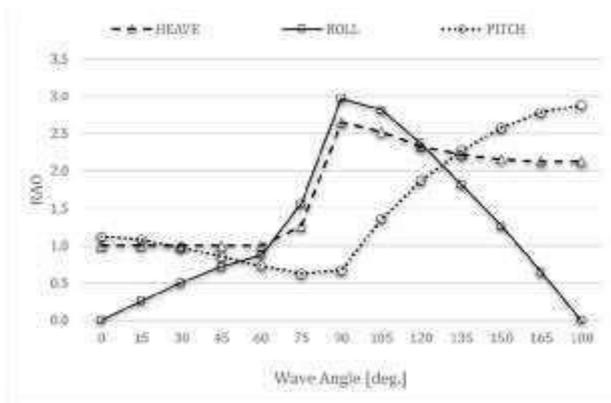
Gambar. 8. RAO Pitch Following-Beam Sea



Gambar. 9. RAO Pitch Beam-Head Sea



Berikutnya pada kondisi *beam sea*, nilai terbesar terjadi untuk gerakan *roll* sebesar 2,969 derajat, *heave* 2,65 meter dan *pitch* 0,668 derajat. Respon gerakan yang relatif paling kecil dialami kapal pada saat kondisi gelombang *following sea* (0 derajat). Pada kondisi ini gerakan *pitch*, *heave* dan *roll* secara berturut-turut sebesar 1,12 derajat, 1 meter dan 0 derajat.



Gambar. 10. Perbandingan RAO *Heave*, *Pitch* dan *Roll*

Dari ketiga kondisi gelombang utama tersebut, dapat dilihat terjadi disparitas yang besar antara gerakan yang satu dengan gerakan yang lainnya. Perbedaan yang relatif tidak besar ditemukan pada kondisi gelombang perempat-an, baik itu pada kondisi *following-quartering sea* (45 derajat) maupun *bow-quartering sea* (135 derajat).

TABLE III. SELISIH RAO

Sudut	Gerakan			Selisih Terbesar (%)
	<i>Pitch</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	
0	1.120	0.000	1.004	100
15	1.076	0.260	1.003	75.836
30	0.973	0.503	1.003	51.387
45	0.851	0.712	1.003	34.195
60	0.731	0.880	1.005	27.264
75	0.623	1.563	1.262	60.141
90	0.668	2.969	2.651	77.501
105	1.356	2.814	2.523	51.812
120	1.874	2.361	2.323	25.987
135	2.272	1.821	2.215	19.850
150	2.576	1.260	2.154	51.087
165	2.786	0.643	2.128	76.920
180	2.881	0.000	2.130	100

Kondisi *following-quartering sea* memberikan perbedaan antar respon gerakan maksimal sebesar 29% saja. Nilai prosentase

perbedaan yang lebih kecil lagi diperoleh pada saat *bow-quartering sea* dengan perbedaan 19,8%. Hal ini dapat memberikan informasi kepada operator kapal katamaran dalam melakukan manuver mengenai karakteristik gerakan kapal yang paling optimal ditinjau dari sisi penyesuaian terhadap arah propagasi atau sudut datang gelombang. Informasi lebih lengkap mengenai perbedaan atau selisih antar gerakan disajikan pada Tabel III yang menunjukkan dengan detail prosentase selisih antar gerakan yang terbesar yang terjadi untuk semua jenis gerakan osilasi yang dialami kapal katamaran berdasarkan perubahan arah propagasi gelombang. Prosentase terbesar berada pada kondisi *following sea* dan *head sea* sebesar 100%. Hal ini dikarenakan pada kedua kondisi ini hampir tidak terjadi gerakan *roll*.

V. KESIMPULAN

Respon gerakan kapal katamaran akibat pengaruh gelombang reguler dipengaruhi oleh arah datang gelombangnya. Ditinjau dari jenis gerakan, respon gerakan *roll* memberikan magnifikasi yang terbesar sebesar 2,969 deg. pada kondisi gelombang *beam sea* dan terkecil mendekati nilai nol pada kondisi gelombang *following* dan *head sea* untuk gerakan *heave* dan *pitch*. Apabila dilihat dari kondisi gelombang, sudut 90 derajat memberikan efek gerakan pada kapal katamaran terbesar untuk gerakan *roll* dan *heave*, sedangkan kondisi *head sea* berpengaruh besar terhadap gerakan *pitch* sebesar 2,881 deg. Kondisi gelombang yang optimal dapat terjadi pada saat kondisi *following-quartering sea* dan *bow-quartering sea* dengan selisih antar gerakan memiliki prosentase rentang nilai berkisar 19 % sampai 29 persen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya kepada institusi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) yang telah memberikan dukungan terhadap terselesaikannya artikel ini. Dukungan tersebut berupa dana, fasilitas publikasi artikel dan bentuk lain sehingga penulis sangat terbantu untuk terus mengembangkan pengetahuan dengan melaksanakan penelitian-penelitian khususnya bidang maritim.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bunari, M. "Comparison Design Study Of Catamaran And Monohull Ship As A Research Vessel In Bengkalis Riau Sea", ITS Library, 2013.
- [2] Molland, A.F., "The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation", London: Butterworth-Heinemann, 2008, p. 543.
- [3] Bergdahl, L., "Wave-Induced Loads and Ship Motions", Chalmers University of Technology: Sweden, 2009.
- [4] Bhattacharya, R., "Dynamic of Marine Vehicles", John Wiley and Sons Inc., 1972.
- [5] "Maxsurf Motions: Program and User Manual", Bentley System Incorporated, 2013.
- [6] Djatmiko, E.B., "Perilaku Operabilitas Bangunan Laut Di Gelombang Acak", ITS Press: Surabaya, 2013.



Halaman ini sengaja dikosongkan

