

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penentuan Ukuran Utama *Barge*

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan Tongkang menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Modeller* sebagai pemodelan awal yang nantinya akan dilakukan analisis pengaruh penambahan *Skeg* dan modifikasi sudut *skeg* pada Tongkang terhadap hambatan dan olah gerak. Model Tongkang tanpa *Skeg* dan penambahan konfigurasi 3 *Skeg* dengan variasi sudut *Skeg* berbeda (model modifikasi).

Kajian ini menjelaskan mengenai perhitungan untuk menentukan seberapa berpengaruh penambahan *Skeg* dan pembuatan kemiringan sudut di antara *Skeg* yang ada di samping, sehingga penulis mendapatkan gambar pra perancangan berupa rencana garis, model 3D dan analisa dari hasil pra perancangan tersebut berupa data hidrostatis, hambatan, dan olah gerak. Analisa pemodelan lambung Tongkang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Maxsurf*.

Perancangan panjang design kapal adalah 300 *feet*. Berdasarkan data kapal referensi yang diterima, ukuran utama *Oil Barge* yang direncanakan melalui proses regresi linear atau optimalisasi ukuran. Panjang data kapal referensi yang diperoleh adalah 88 s/d 92 meter, dengan penentuan dwt Tongkang 6000 ton, yang kemudian dikelompokkan untuk masing-masing ukuran kapal sesuai dengan Tabel 4.1.

Tabel 4.1 data kapal pembanding

Nama kapal	DWT	LOA	B	H	T	No. IMO
SELENE 02	5250	90	21	5,8	4,35	-
FOTB 02	4836	89,92	24,38	3,9	2,92	23908P
GREAT GATUN	4404	91,46	16,46	5,79	4,22	29479U
KSM INESITA	6096	88,39	18,9	5,64	4,22	19843V
PMT 7125	7316	92,24	26	6,7	4,2	49770A
PMT 7225	7293	92,24	26	6,7	4,2	49771B
WHW CHEM 2	7000	89,94	25	5,75	4,3	28521D

Penentuan ukuran utama dilakukan sebagai tahap dasar sebelum model digunakan dalam analisis hambatan dan olah gerak. Ukuran utama kapal tidak ditentukan secara langsung, tetapi disusun berdasarkan data kapal pembanding yang memiliki karakteristik sejenis dengan objek penelitian. Data pembanding tersebut digunakan untuk memperoleh gambaran rentang dimensi kapal, sehingga ukuran model yang digunakan masih berada dalam batas kewajaran desain *Oil Barge* utama. Dengan demikian, model yang dianalisis tidak hanya dibentuk berdasarkan asumsi visual, tetapi memiliki dasar perbandingan terhadap kapal sejenis yang telah beroperasi.

Dari data utama kapal pembanding tersebut, dilakukan koreksi menggunakan perbandingan nilai. Dari perhitungan perbandingan data kapal pembanding, maka didapatkan ukuran utama *Oil Barge* baru seperti di bawah ini:

Tabel 4.2 data utama

Keterangan		Nilai
Panjang (L)	:	90,77
Lebar (B)	:	23,9
Tinggi (H)	:	5,68
Sarat (T)	:	4,25

Berdasarkan hasil perbandingan data kapal pembanding, diperoleh ukuran utama *Oil Barge* dengan panjang 90,77 m, lebar 22,24 m, tinggi 5,68 m, dan sarat 4,25 m. Ukuran tersebut kemudian digunakan sebagai acuan dalam proses pemodelan geometri lambung pada *MAXSURF* Modeller. Pemilihan ukuran ini bertujuan agar model memiliki proporsi yang representatif terhadap karakteristik Tongkang, terutama pada aspek volume apung, luas permukaan basah, dan karakteristik bentuk lambung yang berpengaruh terhadap nilai hambatan.

Tabel 4.3 data hidrostatis utama

No.	Parameter Hidrostatik	Nilai	Satuan
1.	Displacement	8292	ton
2.	Volume Displacement	8090,049	m ³
3.	LWT	2292	ton
4.	DWT	6000	ton
5.	Wetted Surface Area	2796,342	m ²
6.	Waterplane Area	2118,580	m ²
7.	Cb	0,875	
8.	Cp	0,878	
9.	Kb	2,228	m
10.	MTc	158,899	ton

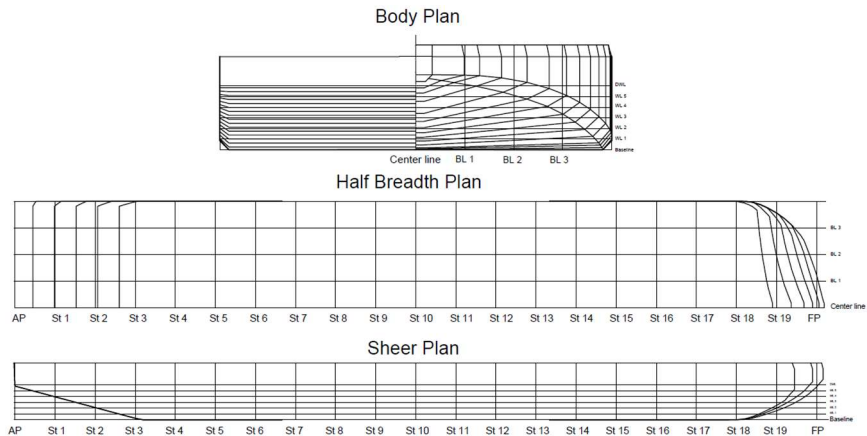
Data hidrostatis pada Tabel 4.3, menunjukkan bahwa parameter ini penting karena berhubungan dengan hambatan gesek yang terjadi pada permukaan lambung. Selain itu, nilai block coefficient sebesar 0,875 menunjukkan bahwa bentuk lambung memiliki karakteristik penuh, sebagaimana umumnya dimiliki oleh Tongkang. Karakteristik tersebut sesuai dengan fungsi Tongkang yang lebih mengutamakan kapasitas muatan dibandingkan kecepatan operasi tinggi.

4.2 Pemodelan Geometry

Pemodelan geometri dilakukan untuk membentuk model Tongkang (*Oil Barge*) yang akan digunakan dalam proses analisis hambatan dan olah gerak. Model di rancang dengan menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Modeller* berdasarkan ukuran utama yang telah diperoleh dari hasil perbandingan jenis kapal. Proses pemodelan dilakukan dengan memperhatikan kesesuaian dimensi utama, bentuk lambung, dan sarat air.

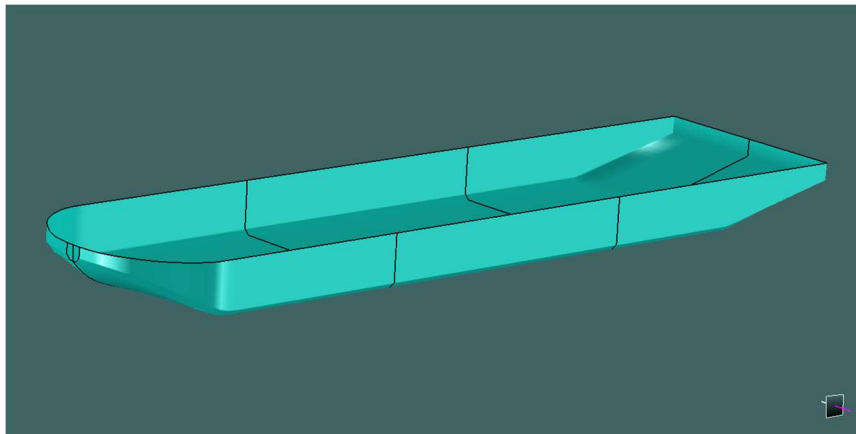
4.2.1 Pemodelan Tongkang

Model Tongkang (*Oil Barge*) dibuat dengan mengacu pada ukuran utama yang diperoleh dari data kapal pembanding. Bentuk lambung dirancang menyerupai karakteristik Tongkang dengan body kapal yang relatif penuh dan dasar lambung yang datar. Bentuk ini sesuai dengan fungsi *Barge* yang beroperasi pada kecepatan rendah dan lebih mengutamakan kapasitas angkut dibandingkan performa pada kecepatan. Pada tahap pemodelan, geometri lambung dirancang melalui surface modelling sehingga menghasilkan bentuk lambung yang dapat dianalisis.



Gambar 4.1 Linesplan Tongkang

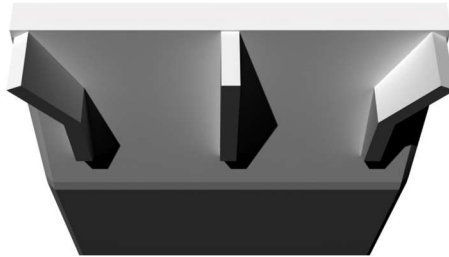
Setelah dibuat model *Lines Plan* kemudian dilakukan pembuatan 3D dengan menggunakan *Maxsurf Modeller*. Pembuatan model dengan membuat surface lambung Tongkang. Tipe geometri yang digunakan NURBS (*Non-Uniform, Rational B-spline Surface*). Lalu model dapat digunakan untuk analisis mencari nilai hambatan dan olah gerak Tongkang.



Gambar 4.2 Model *surface* 3D Tongkang

4.2.2 Pemodelan *Skeg*

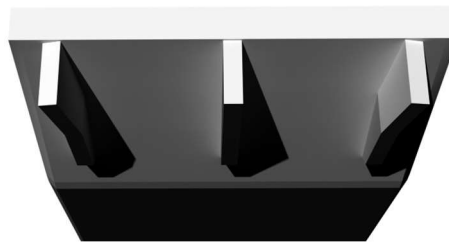
Pemodelan *Skeg* dilakukan setelah model 3D Tongkang berhasil dibuat. *Skeg* dimodelkan dalam beberapa variasi sudut untuk mengetahui pengaruh geometri *Skeg* terhadap performa Tongkang. Variasi sudut *Skeg* yang digunakan dalam penelitian ini dengan meliputi sudut 140°, 150°, 160°, dan 180°. Setiap variasi sudut menghasilkan bentuk *Skeg* yang berbeda secara geometri, di mana semakin kecil sudut maka bentuk *Skeg* semakin condong ke samping. Perbedaan pemodelan variasi sudut samping pada *skeg* dengan contoh gambar di bawah ini:



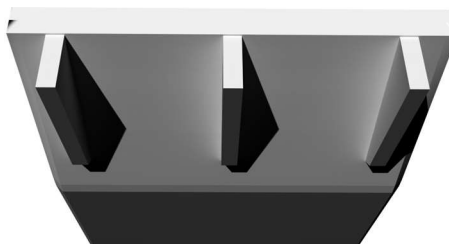
Gambar 4.3 *Skeg* sudut 140°



Gambar 4.4 *Skeg* sudut 150°



Gambar 4.5 *Skeg* sudut 160°

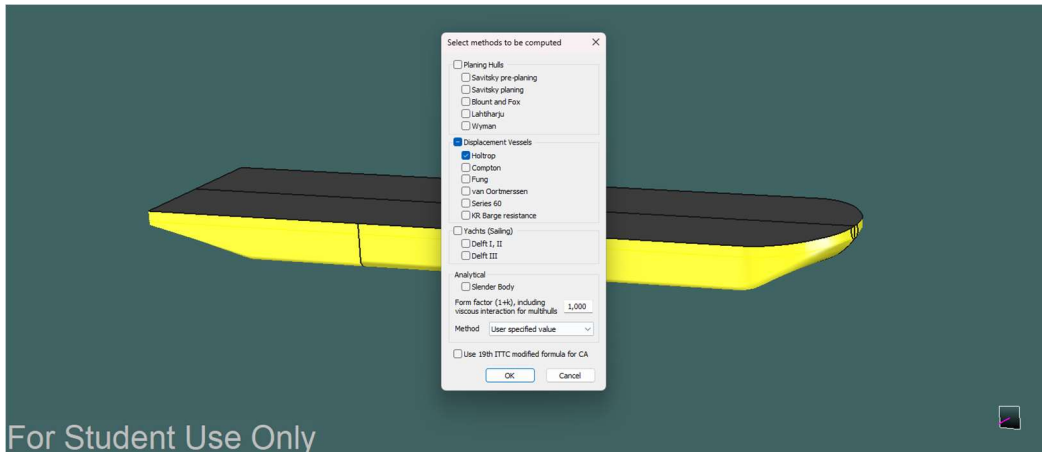


Gambar 4.6 *Skeg* sudut 180°

4.3 Analisis Hambatan

Analisis hambatan penting untuk mengevaluasi *trade-of* antara peningkatan hambatan akibat penambahan *Skeg*. Tongkang umumnya beroperasi pada kecepatan towing rendah, sehingga hambatan gesek (*frictional Resistance*) merupakan komponen dominan. Besarnya hambatan kapal ditentukan dengan membandingkan hasil hambatan yang diperoleh dalam bentuk grafik terhadap kecepatan kapal.

4.3.1 Simulasi Analisis Hambatan

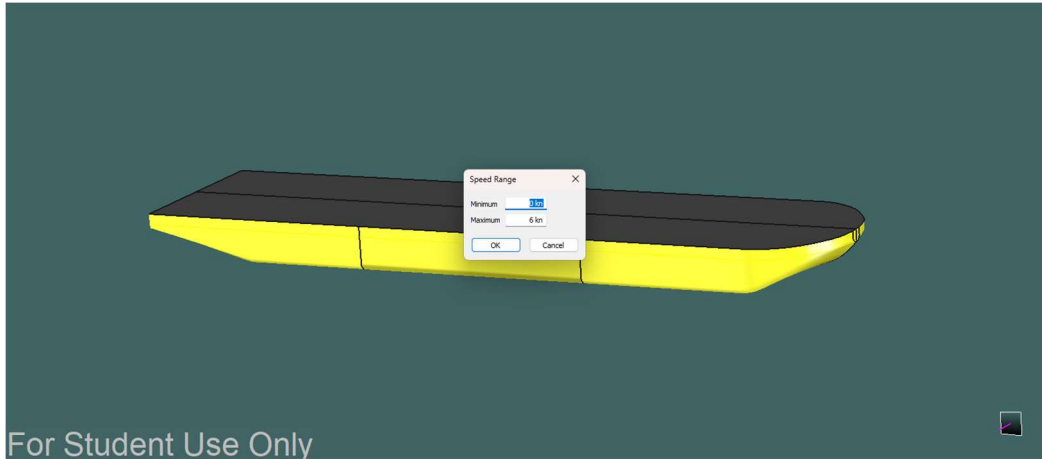


Gambar 4.7 Pemilihan Metode

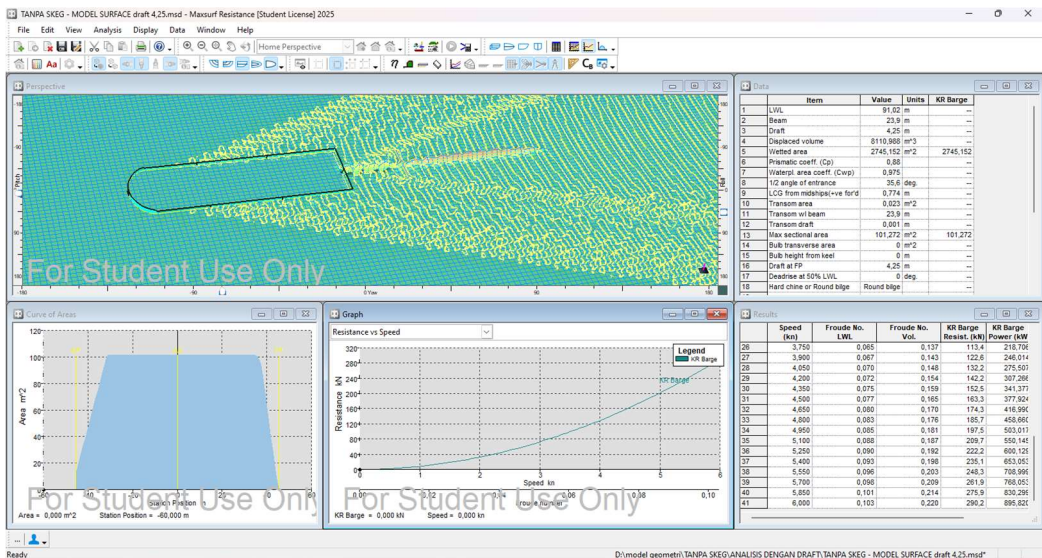
Dalam *Maxsurf Resistance* terdapat beberapa pilihan metode perhitungan hambatan kapal, salah satunya adalah metode *Holtrop*. Pada penelitian ini, metode *Holtrop* digunakan karena model yang dianalisis merupakan Tongkang dengan bentuk lambung yang cenderung penuh, dan dasar lambung yang datar. Karakteristik tersebut sesuai dengan pendekatan *Holtrop* yang digunakan untuk memperhitungkan hambatan kapal tipe Tongkang. Pemilihan metode ini juga mempertimbangkan kesesuaian antara bentuk geometri kapal, kondisi kecepatan operasi, serta tujuan penelitian yang berfokus pada analisis hambatan Tongkang dengan penambahan dan variasi bentuk *Skeg*.

Penggunaan metode *Holtrop* memungkinkan peneliti memperoleh nilai hambatan total dengan model Tongkang. Hasil yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar untuk membandingkan pengaruh konfigurasi model terhadap hambatan yang diperoleh. Dengan menggunakan metode yang sama pada setiap variasi model, hasil perbandingan dapat dianalisis secara lebih konsisten karena seluruh model dihitung dengan kondisi input dan pendekatan perhitungan yang seragam.

Sebelum proses analisis hambatan dilakukan, langkah selanjutnya menentukan batas kecepatan kapal pada menu *Speed Range* di *Maxsurf Resistance*. Penentuan kecepatan ini bertujuan untuk memberikan rentang kecepatan yang sesuai dengan kondisi operasional Tongkang yang akan dianalisis. Pada penelitian ini, kecepatan maksimum yang digunakan adalah 6 knot (3,086 m/s). Nilai tersebut digunakan sebagai batasan simulasi agar perangkat lunak dapat menghitung hambatan, daya, serta *Froude Number* pada setiap kenaikan kecepatan yang telah ditentukan.



Gambar 4.8 Input Speed Range



Gambar 4.9 Hasil Analisis dan Kalkulasi Model

Setelah pengaturan metode dan rentang kecepatan selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah menjalankan proses perhitungan hambatan. Hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk tabel, grafik, dan visualisasi aliran pada model kapal. Data yang diperoleh meliputi kecepatan kapal, Froude Number, hambatan total, serta kebutuhan daya. Pada tahap ini, *Maxsurf Resistance* menghitung nilai hambatan berdasarkan metode *Holtrop*.

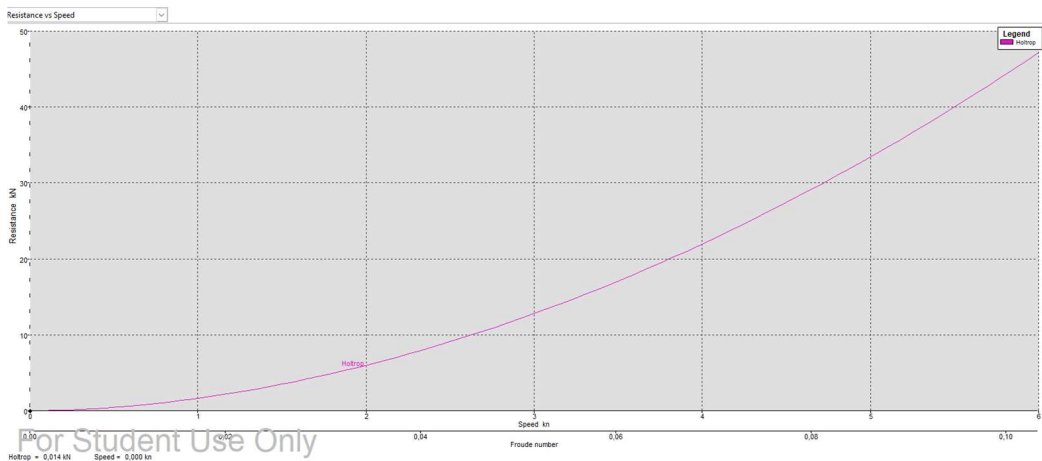
Hasil kalkulasi ini digunakan sebagai dasar untuk mengetahui perubahan hambatan pada setiap kenaikan kecepatan. Selain itu, data hasil perhitungan juga digunakan untuk membandingkan pengaruh penambahan dan modifikasi sudut *Skeg* terhadap hambatan total kapal. Dengan menggunakan metode dan parameter input yang sama pada setiap variasi model, hasil yang diperoleh dapat dianalisis secara konsisten.

Tabel 4.4 Nilai hambatan beserta Froude Number (tanpa *Skeg*)

Speed	Froude No. LWL	Froude No. Vol	Resistance (kN)
1	0,018	0,038	0,18
2	0,034	0,071	5,7
3	0,052	0,110	12,8
4	0,07	0,148	22,5
5	0,085	0,181	32,8
6	0,103	0,220	47,1

Berdasarkan hasil analisis *Maxsurf Resistance*, nilai hambatan menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan kapal. Pada kecepatan 1 knot, hambatan yang dihasilkan masih relatif kecil, yaitu sebesar 0,18 kN. Namun, pada kecepatan 6 knot, nilai hambatan meningkat menjadi 47,1 kN. Peningkatan ini menunjukkan bahwa hambatan kapal tidak bertambah secara linear, melainkan meningkat lebih besar pada kecepatan yang lebih tinggi.

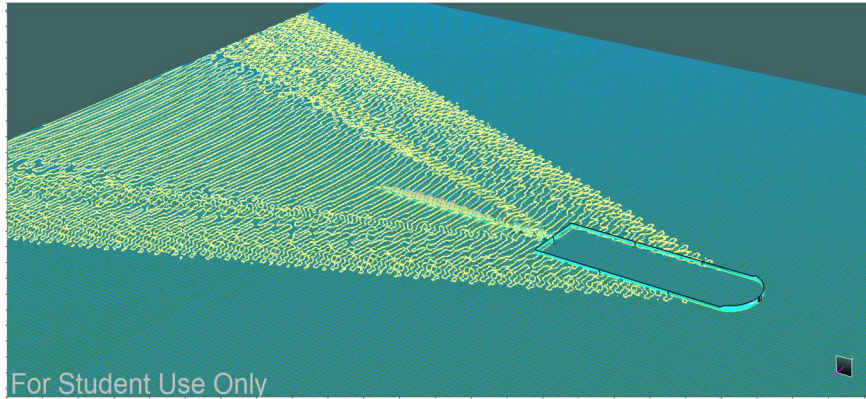
Nilai *Froude Number LWL* dan *Froude Number Vol* juga mengalami peningkatan pada setiap kenaikan kecepatan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan Tongkang, semakin besar pula pengaruh gerakan kapal terhadap pembentukan gelombang dan tahanan hidrodinamika. Pada kecepatan 6 knot, nilai *Froude Number LWL* sebesar 0,103, sedangkan *Froude Number Vol* sebesar 0,220. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Tongkang masih berada pada kategori kecepatan rendah hingga sedang, sehingga karakteristik hambatan masih sesuai dianalisis menggunakan pendekatan metode *Holtrop*.



Gambar 4.10 Grafik Nilai Hambatan pada tiap kecepatan

Grafik pada Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara kecepatan kapal dan nilai hambatan yang dihasilkan saling berhubungan. Berdasarkan grafik tersebut, terlihat bahwa nilai hambatan meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan. Kenaikan hambatan pada kecepatan rendah masih terlihat relatif kecil, sedangkan pada kecepatan yang lebih tinggi kenaikannya menjadi lebih besar. Kondisi ini terjadi karena peningkatan kecepatan menyebabkan bertambahnya gaya gesek, tekanan fluida, dan pembentukan gelombang di sekitar lambung kapal.

Bentuk grafik yang cenderung naik menunjukkan bahwa kebutuhan daya untuk menarik Tongkang juga akan meningkat apabila kecepatan operasi dinaikkan. Dengan demikian, kecepatan operasi menjadi salah satu faktor penting dalam menentukan efisiensi penarikan Tongkang. Semakin tinggi kecepatan yang digunakan, maka semakin besar hambatan yang harus diatasi oleh Tugboat.



Gambar 4.11 Proses simulasi analisa hambatan tampak samping

4.3.2 Validasi data hasil Hambatan

A. Perbandingan Perangkat lunak

Validasi dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan tingkat kesalahan (error) dari hasil simulasi numerik menggunakan perangkat lunak CFD (*ANSYS Fluent*) terhadap data perhitungan desain utama pada kondisi kecepatan operasional tertinggi dari ($V_s = 6$ knot). Data yang diuji validitasnya adalah konfigurasi Tongkang tanpa skeg pada kecepatan 6 knot, di mana nilai hambatan total dari hasil simulasi numerik dibandingkan secara langsung dengan nilai hasil perhitungan tabel utama. Rumus yang digunakan untuk menghitung persentase kesalahan adalah sebagai berikut:

$$\text{Error (\%)} = \frac{RT_{\text{Ansys}} - RT_{\text{Maxsurf}}}{RT_{\text{Maxsurf}}} \times 100\%$$

Tabel 4.5 Validasi hasil hambatan pada kedua perangkat lunak

Parameter	Hasil <i>Resistance Ansys</i>	Hasil <i>Resistance Maxsurf</i>	Relatif error
Hambatan total	46,17	47,10	1,97%

Zone	Forces [kN]			Coefficients		
	Pressure	Viscous	Total	Pressure	Viscous	
Total						
ship-wall	15.779886	2.0452301	17.825116	-nan (ind)	-nan (ind)	-
nan (ind)						
submerge-wall	30.39092	9.8952233	40.286144	-nan (ind)	-nan (ind)	-
nan (ind)						

Net	46.170806	11.940453	58.11126	-nan (ind)	-nan (ind)	-
nan (ind)						

Gambar 4.12 Hasil Hambatan *Ansys Fluent*

4.3.3 Hasil Hambatan

Setelah dilakukan analisis hambatan pada model dasar, tahap selanjutnya adalah membandingkan nilai hambatan total pada beberapa variasi *Skeg* untuk mengetahui pengaruh perubahan sudut *Skeg* terhadap performa hambatan Tongkang. Variasi yang dianalisis terdiri atas model tanpa *Skeg*, *Skeg* 180°, *Skeg* 160°, *Skeg* 150°, dan *Skeg* 140°. Analisis dilakukan sesuai dengan parameter tabel di bawah ini.

Tabel 4.6 Data Variasi Kondisi Simulasi Hambatan

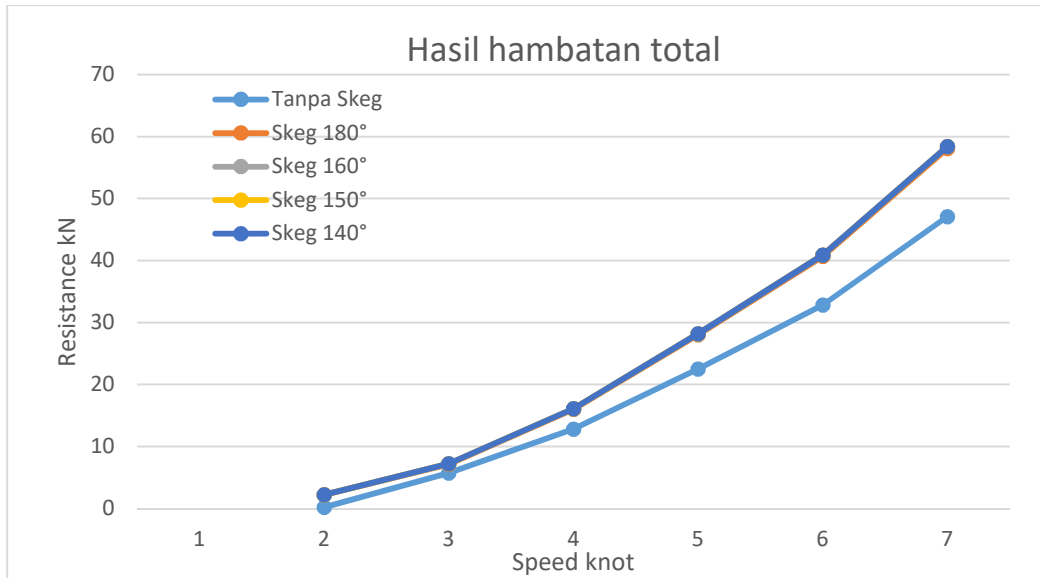
Model Tongkang	Kecepatan
Tanpa <i>Skeg</i> <i>Skeg</i> 180° <i>Skeg</i> 160° <i>Skeg</i> 150° <i>Skeg</i> 140°	1-6 knot

Tabel 4.7, menunjukkan parameter dan kondisi simulasi yang digunakan dalam pengujian hambatan total pada model tongkang. Simulasi dilakukan dengan membandingkan 5 variasi kondisi model tongkang, yaitu model dasar tanpa menggunakan *skeg* serta penambahan *skeg triple skeg* yang mempunyai variasi sudut samping 180°, 160°, 150°, dan 140°. Setiap variasi model tersebut diuji pada rentang kecepatan operasional yang sama, yaitu mulai dari kecepatan 1 knot hingga mencapai kecepatan 6 knot. Pengujian dengan parameter yang sama ini bertujuan untuk mendapatkan data peningkatan hambatan tongkang, sekaligus untuk memastikan bahwa pengaruh perubahan sudut *skeg* samping terhadap performa hidrodinamika tongkang.

Tabel 4.7 Komponen Hambatan Total kN

Vs (knot)	Tanpa <i>Skeg</i>	<i>Skeg</i> 180°	<i>Skeg</i> 160°	<i>Skeg</i> 150°	<i>Skeg</i> 140°
1	0,18	2,2	2,2	2,2	2,2
2	5,7	7,1	7,2	7,2	7,2
3	12,8	16,0	16,1	16,1	16,1
4	22,5	28,0	28,2	28,2	28,2
5	32,8	40,7	40,9	40,9	40,9
6	47,1	58,1	58,4	58,4	58,4

Analisis hambatan total pada tiap variasi dilakukan pada rentang kecepatan 1 hingga 6 knot dengan kelima konfigurasi model yang dibandingkan. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Tabel 4.7, nilai hambatan total seluruh model menunjukkan peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya kecepatan. Pada kecepatan 1 knot, hambatan model tanpa *Skeg* tercatat sebesar 0,18 kN, sedangkan seluruh model dengan penambahan *Skeg* menghasilkan hambatan yang sama yaitu 2,2 kN. Seiring meningkatnya kecepatan, selisih hambatan antar model tetap kecil namun terus terlihat.



Gambar 4.13 Grafik Hambatan total seluruh variasi

Gambar 4.13, memperlihatkan bahwa seluruh grafik hambatan berhimpitan sangat rapat sepanjang rentang kecepatan yang dianalisis. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penambahan *Skeg* dengan berbagai variasi sudut tidak terlalu signifikan terhadap hambatan.

4.4 Analisis Olah gerak

Analisis olah gerak Tongkang dilakukan menggunakan metode difraksi-radiasi tiga dimensi (*3D panel method*) dalam domain frekuensi pada perangkat lunak *Ansys Aqwa*. Analisis mencakup 5 variasi model, yaitu Tongkang tanpa *Skeg* sebagai model awal, serta Tongkang dengan penambahan *Skeg* sudut 180°, 160°, 150°, dan 140°. Setiap variasi dianalisis pada rentang frekuensi gelombang (0,1 rad/s hingga 4 rad/s) dengan 5 sudut datang gelombang (heading) yaitu 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°.

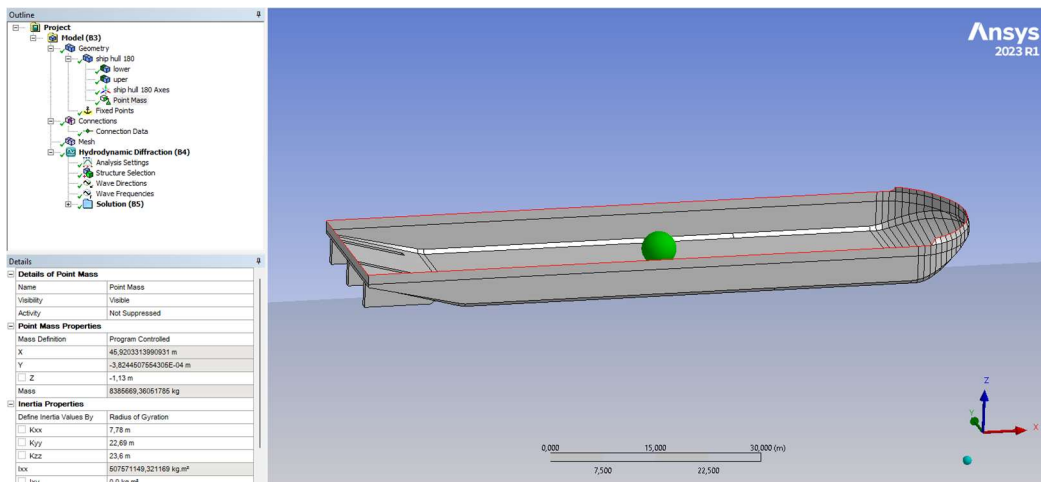
Hasil dianalisis dalam bentuk *Response Amplitude Operator* (RAO) yang merepresentasikan amplitudo respons gerakan Tongkang per satuan amplitudo gelombang. RAO merupakan fungsi frekuensi gelombang yang menggambarkan karakteristik dinamis Tongkang pada setiap mode gerakan. Kondisi perairan yang digunakan menggunakan gelombang reguler wave. Analisis olah gerak Tongkang dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *Ansys Aqwa*, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Parameter Gelombang dan Kondisi Simulasi

Parameter	Nilai	Satuan
Kecepatan simulasi	0 dan 6	knot
Rentang frekuensi	0,1 – 4	rad/s
Total structural mass	8.292	ton
Heading gelombang	0°, 45°, 90°, 135°, 180°	°
Amplitudo	1 (regular wave)	m
Densitas air laut	1.025	kg/m ³
Gravitasi	9,806	m/s ²

4.4.1 Simulasi Analisis Olah gerak

Tahap pertama adalah penentuan titik berat kapal (*point of mass*). Input nilai *point of mass* dapat dilakukan secara otomatis maupun manual. Titik berat ini direpresentasikan sebagai titik hijau pada model 3D Tongkang dan menjadi acuan perhitungan dinamika kapal dalam analisis *seakeeping*.



Gambar 4.14 Poin Mass

Tahap awal pemodelan hidrodinamik di *Ansys Aqwa* dimulai dengan mendefinisikan *point mass* (titik berat kapal). Lokasi pusat massa (*Center of Gravity*) diinput untuk mempresentasikan distribusi massa total tongkang sebesar 8.292 ton. Pada gambar, point mass ditandai dengan hijau buat di tengah kapal, yang berfungsi sebagai acuan utama dalam perhitungan momen inersia dan respons struktur kapa terhadap gaya eksternal.

Dalam analisis karakteristik olengan (*seakeeping*) dan dinamika kapal di atas gelombang, distribusi massa kapal direpresentasikan melalui nilai radius girasi (*radius of gyration*). Pada tahapan perancangan awal (*preliminary design*) atau ketika data distribusi massa detail kapal belum diketahui secara menyeluruh, radius girasi kapal dapat diestimasi menggunakan pendekatan empiris berbasis dimensi utama kapal (ITTC, 2021)

Pada saat menginput setup point mass terdapat Radius of Gyration. Radius of Gyration sendiri merupakan sebuah parameter geometri yang mempresentasikan distribusi massa struktur tongkang di sekitar poros rotasinya. Dalam pemodelan numerik menggunakan *Ansys Aqwa*, nilai radius girasi untuk tiga sumbu utama (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz}) wajib diinput secara manual pada bagian *Detail of Point Mass*. Ketepatan penginputan nilai radius girasi ini benar-benar perlu diperhatikan, karena kesalahan nilai inersia akan menggeser puncak frekuensi alami pada kurva *Response Amplitude Operator* (Iqbal & Trimulyono, 2025).

A. Radius Girasi Gerak Roll (K_{xx})

Radius girasi K_{xx} , mempresentasikan distribusi massa terhadap sumbu longitudinal kapal (sumbu X) yang memengaruhi karakteristik gerakan oleng.

$$K_{xx} = k \times B$$

Di mana:

K_{xx} = Radius girasi gerak *roll* (m)

B = Lebar (*beam*) tongkang (m)

k = Koefisien empiris jenis kapal (0,34)

B. Radius Girasi Gerak Pitch (K_{yy})

Radius girasi K_{yy} mempresentasikan distribusi massa terhadap sumbu Y yang memengaruhi karakteristik gerakan anggukan.

$$K_{yy} = 0,25 \times L_{pp}$$

Di mana:

K_{yy} = Radius girasi gerak *pitch* (m)

L_{pp} = Panjang antar garis tegak tongkang

C. Radius Girasi Gerak Yaw (K_{zz})

Radius girasi K_{zz} mempresentasikan distribusi massa terhadap sumbu vertikal sumbu Z yang memengaruhi karakteristik gerakan geleng.

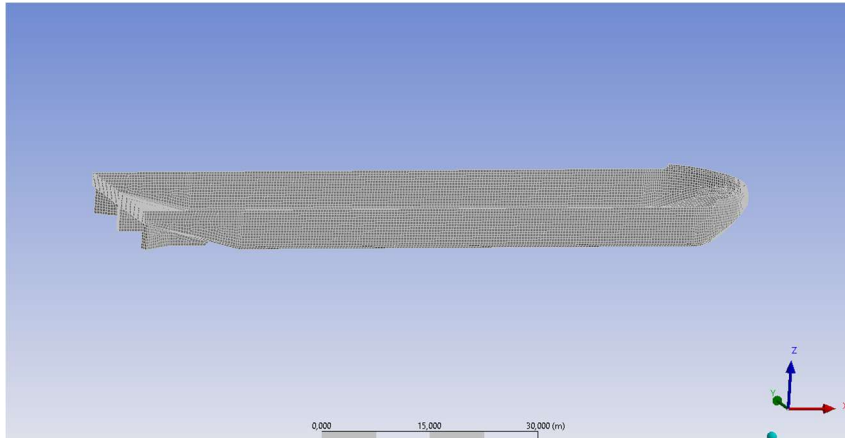
$$K_{zz} = 0,26 \times L_{pp}$$

Di mana:

K_{zz} = Radius girasi gerak *yaw* (m)

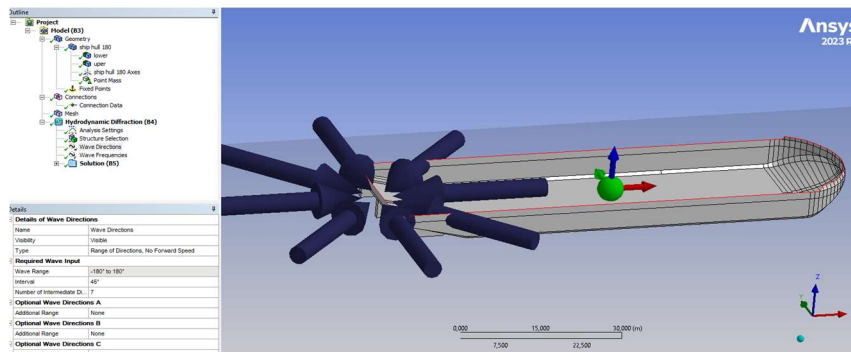
L_{pp} = Panjang antar garis tegak tongkang

Aplikasi nilai-nilai pendekatan empiris ini memiliki validitas metodologis yang kuat dan telah diadopsi secara luas sebagai *standard practice* dalam menentukan parameter input awal inersia massa. Prosedur standar yang direkomendasikan oleh *International Towing Tank Conference* (ITTC) menyatakan bahwa penggunaan estimasi berbasis dimensi utama ini sepenuhnya valid untuk simulasi hidrodinamika numerik maupun sebagai parameter penyetaraan inersia dalam eksperimen pengujian model fisik (ITTC, 2021).



Gambar 4.15 Input mesh

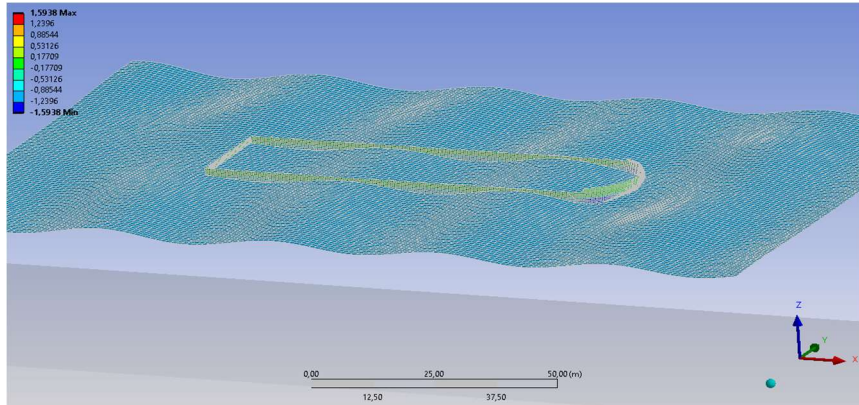
Setelah titik berat ditentukan, model Tongkang dilakukan *meshing* yaitu proses pembagian permukaan lambung kapal menjadi elemen-elemen kecil berbentuk panel. Kualitas dan kerapatan *mesh* sangat mempengaruhi akurasi hasil analisis hidrodinamika yang akan diperoleh. Pada proses *meshing* semakin kecil bagian meshnya dan semakin banyak menunjukkan keakuratan yang makin tinggi juga, tetapi tetap harus melakukan konvergensi untuk menentukan mesh yang paling optimal. Di dalam program ini terdapat beberapa mesh, ada *surface mesh*, *comined mesh*, dan *program controlled*, dalam kajian ini penulis menggunakan *mesh program controlled* dengan *mesih 0,4*.



Gambar 4.16 Pendefinisian arah datang gelombang

Tahap berikutnya menentukan arah datang gelombang (*wave direction*) terhadap sumbu longitudinal tongkang. Pada visualisasi ini, tanda panah berwarna biru menunjukkan arah sudut datang gelombang yang divariasikan dari 0° hingga 180° , sesuai dengan variasi. Langkah ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana karakteristik gerakan tongkang berubah saat menghadapi kondisi head sea, bow quartering sea, beam sea, following sea, maupun stern quartering sea.

Mendefinisikan arah datang gelombang (*wave direction*) terhadap kapal, arah gelombang divariasikan - ditunjukkan oleh anak panah yang menyebar ke berbagai sudut - untuk mensimulasikan kondisi perairan nyata yang mungkin dihadapi Tongkang, sehingga respons gerak kapal dapat dievaluasi dari berbagai sudut serangan gelombang.



Gambar 4.17 Hasil Simulasi

Setelah proses *running* selesai, hasil analisis *Hydrodynamic Diffraction* divisualisasikan dalam bentuk kontur warna pada permukaan lambung kapal dan domain fluida sekitarnya. Kontur ini menunjukkan distribusi tekanan hidrodinamis total akibat gelombang regular pada frekuensi tertentu. Data asli dari distribusi tekanan ini yang nantinya diekstrak menjadi kurva amplitudo respons gerakan tongkang per satuan amplitudo gelombang atau *Response Amplitude Operator* (RAO).

4.4.2 Validasi data hasil Olah gerak

A. Validasi Uji konvergen mesh

Uji konvergen mesh dilakukan untuk memastikan bahwa hasil dari simulasi yang diperoleh dari pemodelan Ansys Aqwa telah mencapai kondisi independen terhadap ukuran grid. Pengujian ini membuktikan bahwa variasi mesh elemen tidak lagi mengubah hasil kalkulasi respons hidrodinamika secara signifikan. Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan tiga variasi ukuran mesh pada beberapa sudut gelombang.

Tabel 4.9 Hasil uji konvergen mesh pada gerakan sway

Variasi	Jumlah elemen mesh	0°	45°	90°	135°	180°
MESH 0,4	21265	0,000	2,503	3,545	2,503	0,000
MESH 0,5	13343	0,000	2,503	3,545	2,503	0,000
MESH 0,6	9581	0,000	2,503	3,545	2,503	0,000

Berdasarkan Tabel 4.14, hasil simulasi gerakan sway menunjukkan nilai yang identik pada seluruh variasi mesh di setiap sudut datang gelombang. Pada kondisi heading 0° (following sea) dan 180° (head sea), seluruh variasi jumlah elemen mesh menghasilkan nilai amplitudo respons 0,000 m/m. Sementara nilai amplitudo konsisten tercatat pada sudut 45° dan 135°, serta mencapai nilai maksimum sebesar 3,545 m/m pada sudut datang 90° (beam sea).

Tabel 4.10 Hasil uji konvergen mesh pada gerakan yaw

Variasi	Jumlah elemen mesh	0°	45°	90°	135°	180°
MESH 0,4	21265	0,000	0,886	0,210	0,898	0,000
MESH 0,5	13343	0,000	0,884	0,210	0,896	0,000
MESH 0,6	9581	0,000	0,855	0,210	0,860	0,000

Berdasarkan Tabel 4.10, hasil simulasi gerakan *yaw* menunjukkan perbedaan yang sangat kecil antar variasi mesh. Pada sudut 45°, nilai yang diperoleh berturut-turut adalah 0,886 (MESH 0,4), 0,884 (MESH 0,5), dan 0,855 (MESH 0,6). Pada sudut 90°, ketiga variasi menghasilkan nilai yang sama, yaitu 0,210. Sedangkan pada sudut 135°, nilai yang diperoleh adalah 0,898 (MESH 0,4), 0,896 (MESH 0,5), dan 0,860 (MESH 0,6). Pada sudut 0° dan 180°, seluruh variasi menghasilkan nilai 0,000.

Perbedaan nilai respon gerak *sway* dan *yaw* antar variasi mesh relatif kecil, dengan selisih maksimum sekitar 0,038 ($\pm 4,3\%$) yang terjadi pada sudut 45 antara MESH 0,4 dan MESH 0,6. Perbedaan ini masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima dalam analisis numerik. Berdasarkan hasil perbandingan ketika variasi mesh pada gerakan *sway* dan *yaw*, dapat disimpulkan bahwa simulasi telah mencapai kondisi mesh independen.

4.4.3 Hasil Olah Gerak

Sebelum melakukan analisis, dibutuhkan data variasi yang terdiri atas model tanpa *Skeg*, *Skeg* 180°, *Skeg* 160°, *Skeg* 150°, dan *Skeg* 140°. Analisis dilakukan sesuai dengan tabel di bawah ini.

Tabel 4.11 Data Variasi Kondisi Simulasi Olah gerak

Model Tongkang	Kecepatan	Tinggi dan jenis Gelombang	Arah datang Gelombang
Tanpa <i>Skeg</i> <i>Skeg</i> 180° <i>Skeg</i> 160° <i>Skeg</i> 150° <i>Skeg</i> 140°	0 & 6 knot	(Reguler Wave)	0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°

Berdasarkan Tabel 4.14, simulasi olah gerak dilakukan dengan variasi model tanpa skeg dan model menggunakan skeg pada sudut 180°, 160°, 150°, dan 140°. Seluruh simulasi dilakukan pada kecepatan 0 dan 6 knot, tinggi gelombang 1 m dengan jenis regular wave, serta variasi arah datang gelombang 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°. Variasi ini digunakan untuk mengetahui pengaruh perubahan bentuk skeg terhadap respons olah gerak tongkang. Dari aspek Olah gerak, khususnya gerak *Yaw* dan *Sway* yang menjadi indikator untuk mengetahui respon gerak yang dihasilkan dari nilai puncak RAO.

Analisis olah gerak (*seakeeping*) dilakukan dengan meninjau nilai Response Amplitude Operator (RAO) dari moda gerak translasi *Sway* dan rotasi *Yaw*. Evaluasi ini mengintegrasikan pengaruh variasi sudut datang gelombang (wave heading) dari 0° hingga 180°, variasi kecepatan operasional (0 knot dan 6 knot), serta pengaruh frekuensi eksitasi gelombang (ω) pada rentang 0,1 rad/s hingga 4 rad/s, diperoleh hasil sebagai berikut.

A. Analisis Respon Gerak *Sway*

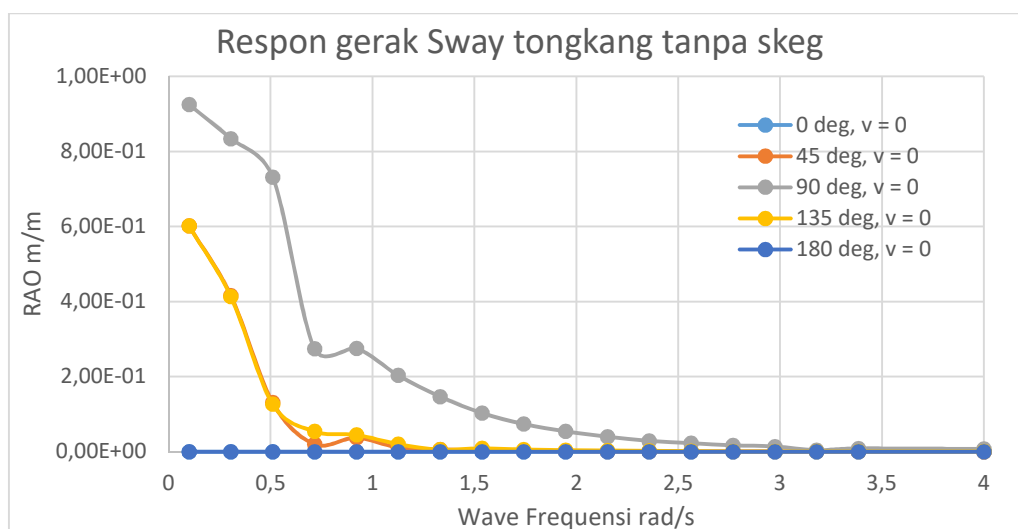
1) Kondisi Kecepatan 0 knot

Karakteristik gerak *Sway* pada kondisi operasional tanpa kecepatan maju dianalisis melalui data hasil respon gerak dari perangkat lunak *Ansys Aqwa* yang ditunjukkan pada tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.12 Respon gerak *Sway* pada kecepatan 0 knot

Variasi	0°	45°	90°	135°	180°
Tanpa <i>Skeg</i>	0,000 m/m	0,601 m/m	0,925 m/m	0,601 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 180°	0,000 m/m	0,543 m/m	0,929 m/m	0,542 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 160°	0,000 m/m	0,535 m/m	0,901 m/m	0,534 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 150°	0,000 m/m	0,535 m/m	0,901 m/m	0,535 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 140°	0,000 m/m	0,533 m/m	0,897 m/m	0,532 m/m	0,000 m/m

Data menunjukkan nilai amplitudo gerak *Sway* bernilai nol (0,000) pada *heading* 0° (*following seas*) dan 180° (*head seas*) di seluruh variasi bentuk lambung. Nilai maksimum gerakan *Sway* secara konsisten terjadi pada sudut gelombang samping 90° (*beam seas*). Penambahan konfigurasi *triple skeg* terbukti mampu mereduksi respon gerak *Sway* ini, di mana variasi *Skeg* 140° menghasilkan nilai gerakan lateral terkecil pada sudut 90° sebesar 0,897 jika dibandingkan lambung Tanpa *Skeg* (0,925).



Gambar 4.18 Grafik RAO gerak *Sway* tanpa *skeg* 0 knot

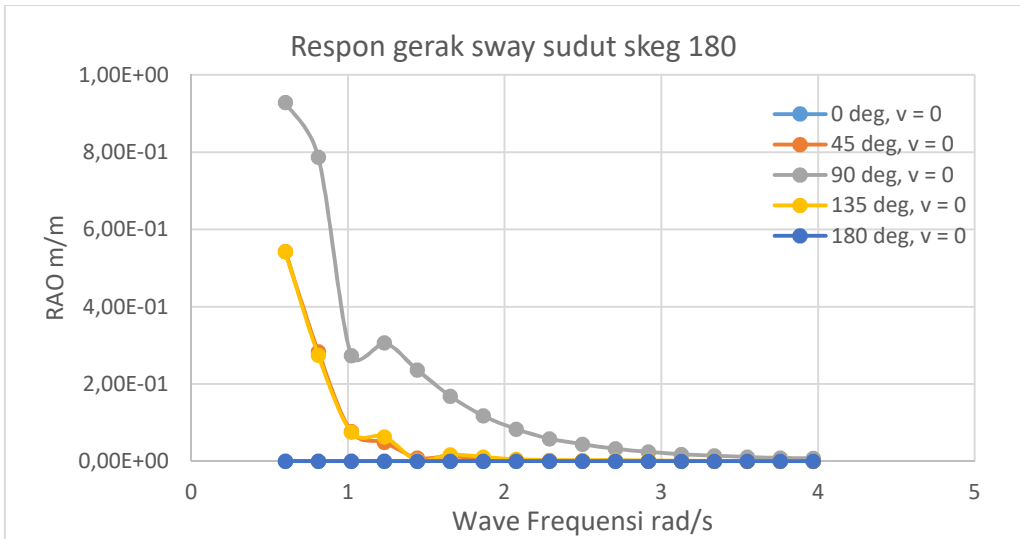
Grafik di atas menunjukkan hubungan antara frekuensi gelombang (*wave frequency*) dalam satuan rad/s, pada sumbu x terhadap nilai amplitudo RAO (*Sway* dalam satuan m/m) pada sumbu Z. Dari grafik tersebut, terdapat beberapa penjelasan yang dapat disimpulkan.

Respon nol pada *heading* 0° dan 180°, kurva RAO berimpitan secara konstan di garis nol. Hal ini mengidentifikasi bahwa gaya eksitasi gelombang dari arah depan maupun belakang hanya memicu gerakan longitudinal seperti *surge* dan *pitch*, sehingga tidak menimbulkan respon gerakan lateral (*Sway*) sama sekali pada tongkang.

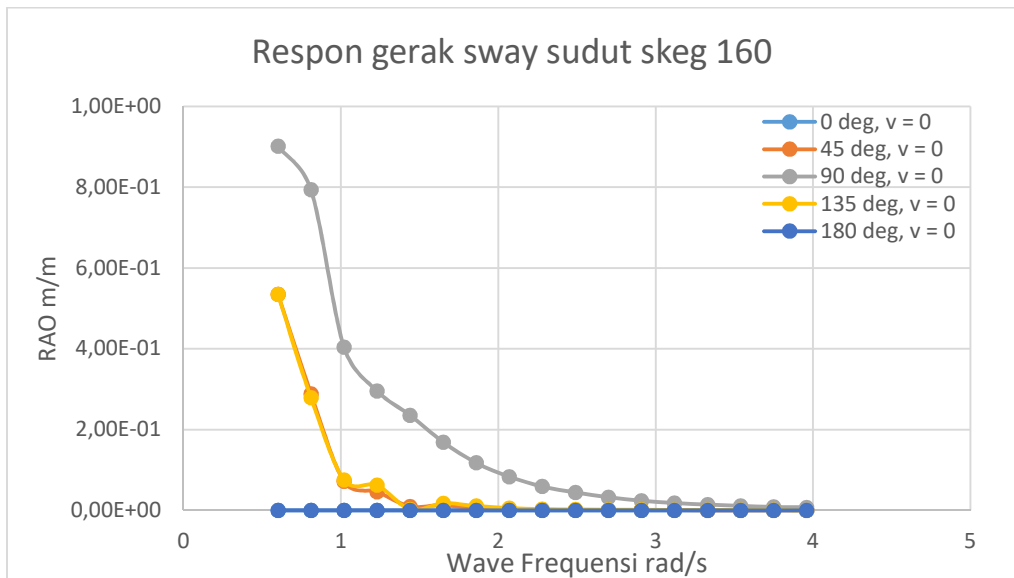
Nilai RAO tertinggi secara konsistensi ditunjukkan oleh (kurva abu abu) yang merepresentasikan sudut datang gelombang 90° (*beam sea*). Pada frekuensi rendah, nilai amplitudo gerakan *Sway* mencapai puncaknya (0,925 m/m). Hal ini terjadi karena lambung tongkang menerima gaya gelombang langsung dari arah samping, yang secara signifikan mendorong badan kapal secara lateral.

Kurva untuk sudut gelombang 45° (kurva oranye) dan 135° (kurva kuning) terlihat saling berimpitan dan menunjukkan kurva yang identik. Karakteristik ini muncul akibat bentuk lambung tongkang yang simetris, sehingga respon gerak lateral yang dihasilkan oleh gelombang (quartering sea) sama besarnya.

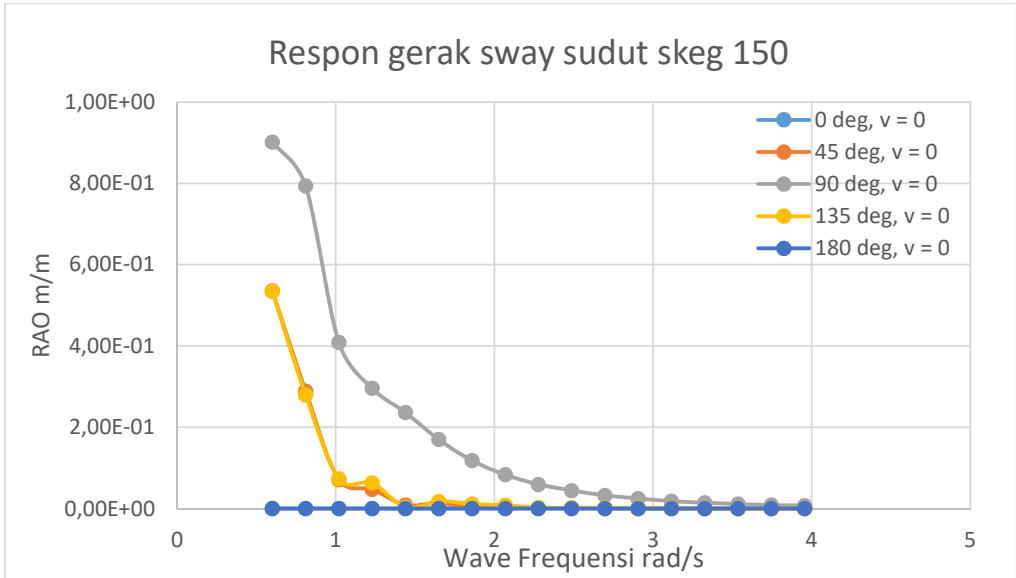
Seluruh kurva yang memiliki respon pada heading (45° , 90° , dan 135°) menunjukkan kurva penurunan yang drastis seiring bertambahnya frekuensi gelombang. Pada frekuensi tinggi (di atas $2,0 \text{ rad/s}$), nilai RAO mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi gelombang dengan frekuensi tinggi, periode gelombang menjadi sangat pendek sehingga gelombang tidak cukup sensitif untuk menggerakkan massa lambung tongkang.



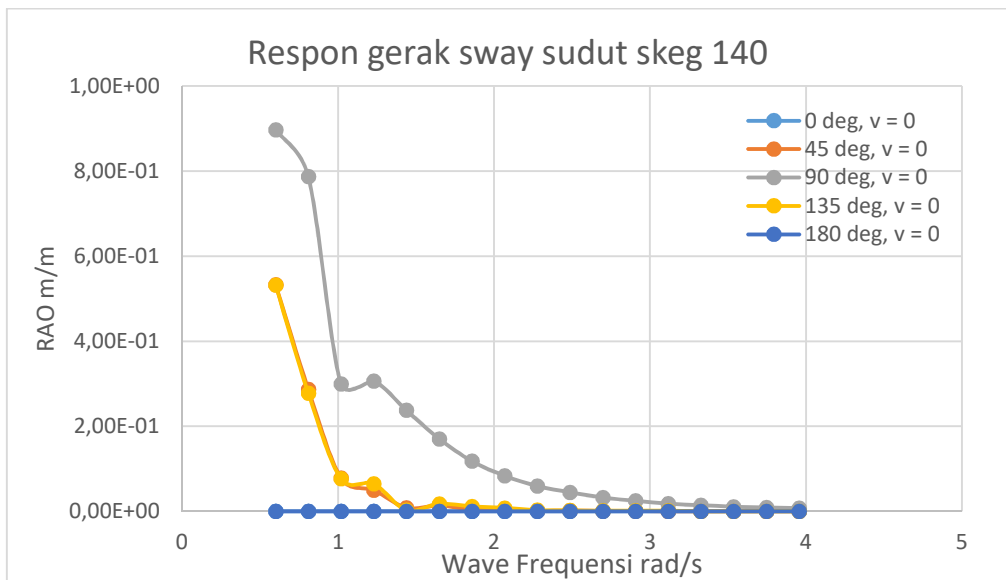
Gambar 4.19 Grafik RAO gerak *Sway* sudut skeg 180 0 knot



Gambar 4.20 Grafik RAO gerak *Sway* sudut skeg 160 0 knot



Gambar 4.21 Grafik RAO gerak Sway sudut skeg 150 0 knot



Gambar 4.22 Grafik RAO gerak Sway sudut skeg 140 0 knot

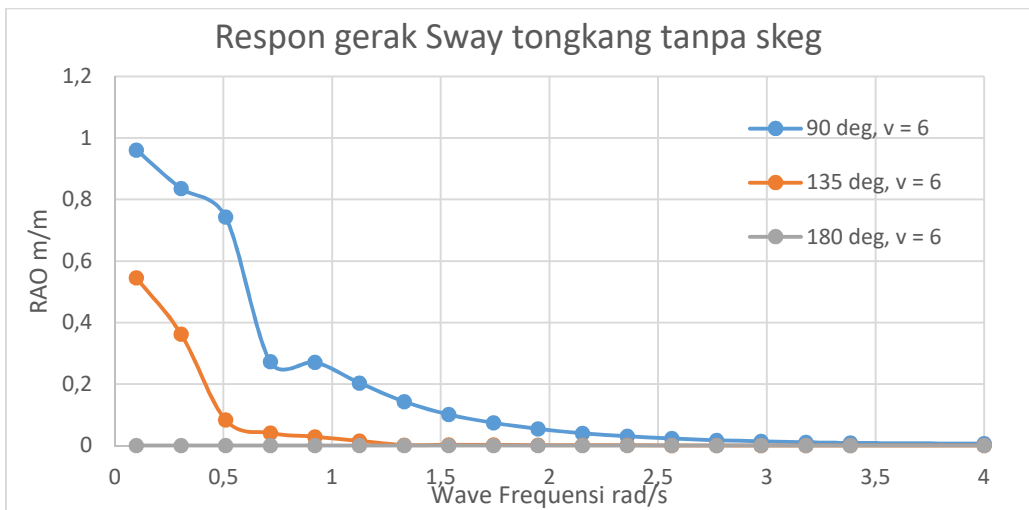
2) Kondisi Kecepatan 6 knot

Perubahan karakteristik respons gerak *Sway* akibat adanya kecepatan maju (6 knot) ditunjukkan melalui tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.13 Respon gerak *Sway* pada kecepatan 6 knot

Variasi	90°	135°	180°
Tanpa <i>Skeg</i>	0,960 m/m	0,545 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 180°	0,886 m/m	0,445 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 160°	0,891 m/m	0,448 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 150°	0,901 m/m	0,470 m/m	0,000 m/m
<i>Skeg</i> 140°	0,906 m/m	0,471 m/m	0,000 m/m

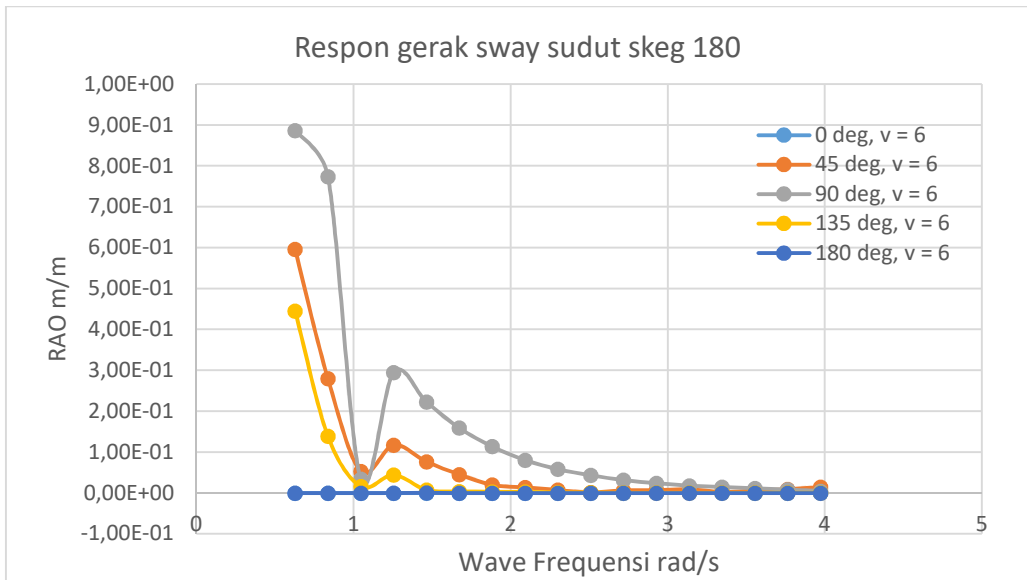
Saat kapal bergerak maju dengan kecepatan 6 knot, seluruh variasi lambung yang menggunakan *triple skeg* merekam penurunan respons *Sway* yang nyata pada sudut datang 90° dan 135° dibandingkan kondisi Tanpa *Skeg*. Pada tongkang ini, variasi *Skeg* 180° memberikan performa peredaman lateral paling optimal dengan nilai respons 0,886 (pada sudut 90°) dan 0,445 (pada sudut 135°).



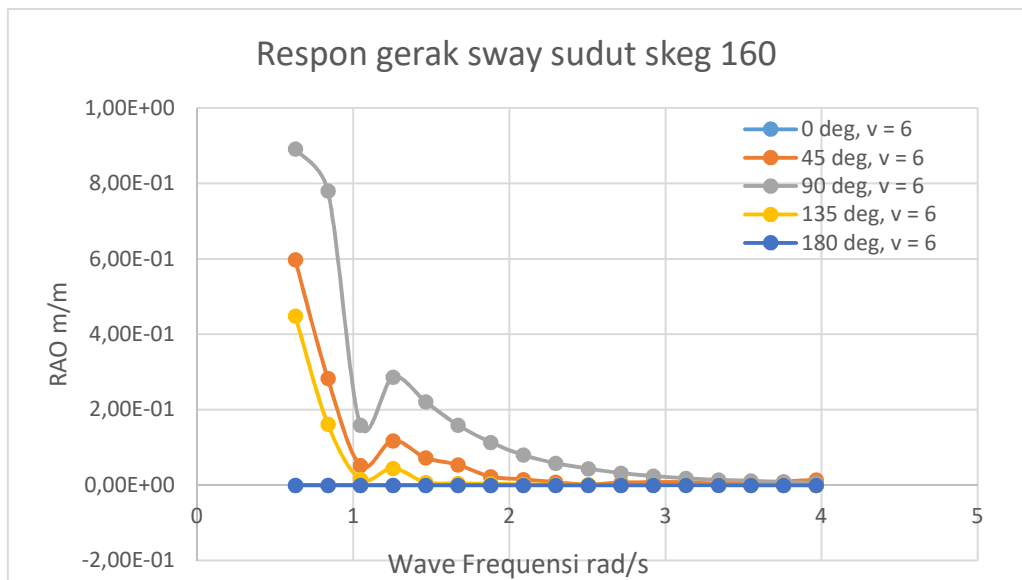
Gambar 4.23 Grafik RAO gerak *Sway* tanpa *skeg* 6 knot

Analisis karakteristik respon gerak *Sway* pada kondisi kecepatan maju 6 knot menunjukkan kurva berbeda pada setiap sudut datang gelombang (heading), dapat dilihat dari grafik RAO di atas. Kurva untuk sudut datang gelombang 90° (Kurva biru) menunjukkan nilai amplitudo tertinggi, terutama pada frekuensi gelombang rendah, dimana respon gerak lateral mencapai nilai maksimum sebelum mengalami penurunan yang konsisten seiring bertambahnya frekuensi gelombang.

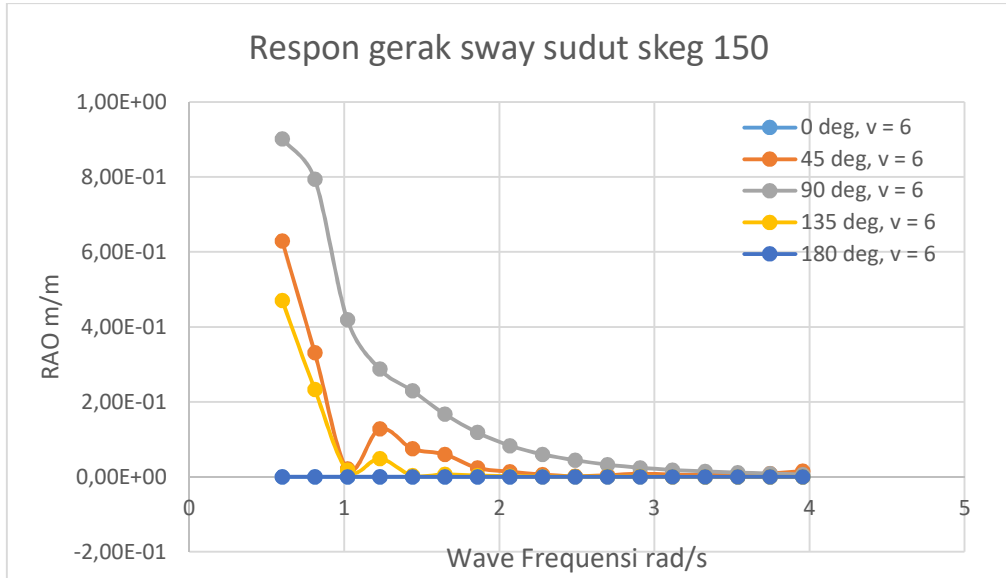
Sementara itu, kurva untuk sudut datang gelombang 135° (Kurva oranye) menghasilkan respon gerak *Sway* yang lebih rendah dibandingkan sudut 90° . Berbeda dengan kedua sudut tersebut, kurva untuk sudut datang gelombang 180° (Kurva abu-abu) tetap berada secara konstan pada garis nol di sepanjang rentang frekuensi yang diuji, yang mengindikasikan bahwa tidak terdapat respon gerakan lateral untuk arah datang gelombang dari belakang. Seluruh kurva menunjukkan penurunan menuju nilai nol saat mencapai frekuensi tinggi di atas $2,5$ rad/s, yang membuktikan bahwa pada kondisi gelombang pendek, energi eksitasi gelombang tidak lagi cukup sensitif untuk memicu gerakan lateral pada lambung tongkang.



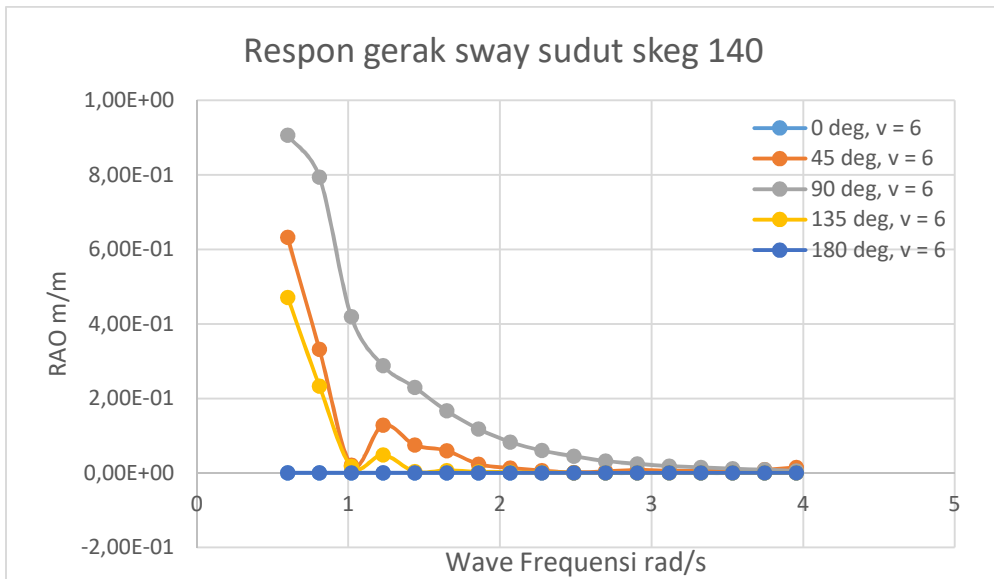
Gambar 4.24 Grafik RAO gerak Sway sudut skeg 180 6 knot



Gambar 4.25 Grafik RAO gerak Sway sudut skeg 160 6 knot



Gambar 4.26 Grafik RAO gerak Sway sudut skeg 150 6 knot



Gambar 4.27 Grafik RAO gerak Sway sudut skeg 140 6 knot

B. Respon Gerak *Yaw*

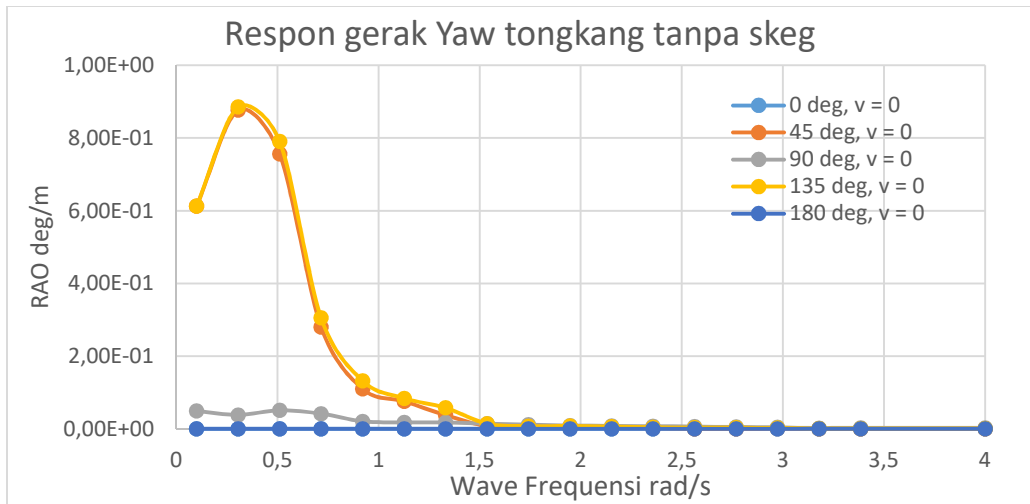
1) Kondisi Kecepatan 0 Knot

Karakteristik respon gerak rotasi horizontal (*Yaw*) pada kondisi diam dipaparkan berdasarkan Tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 4.14 Respon gerak *Yaw* pada kecepatan 0 knot

Variasi	0°	45°	90°	135°	180°
Tanpa <i>Skeg</i>	0,000 deg/m	0,876 deg/m	0,092 deg/m	0,885 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 180°	0,000 deg/m	0,870 deg/m	0,087 deg/m	0,884 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 160°	0,000 deg/m	0,866 deg/m	0,070 deg/m	0,884 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 150°	0,000 deg/m	0,866 deg/m	0,027 deg/m	0,881 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 140°	0,000 deg/m	0,866 deg/m	0,084 deg/m	0,881 deg/m	0,000 deg/m

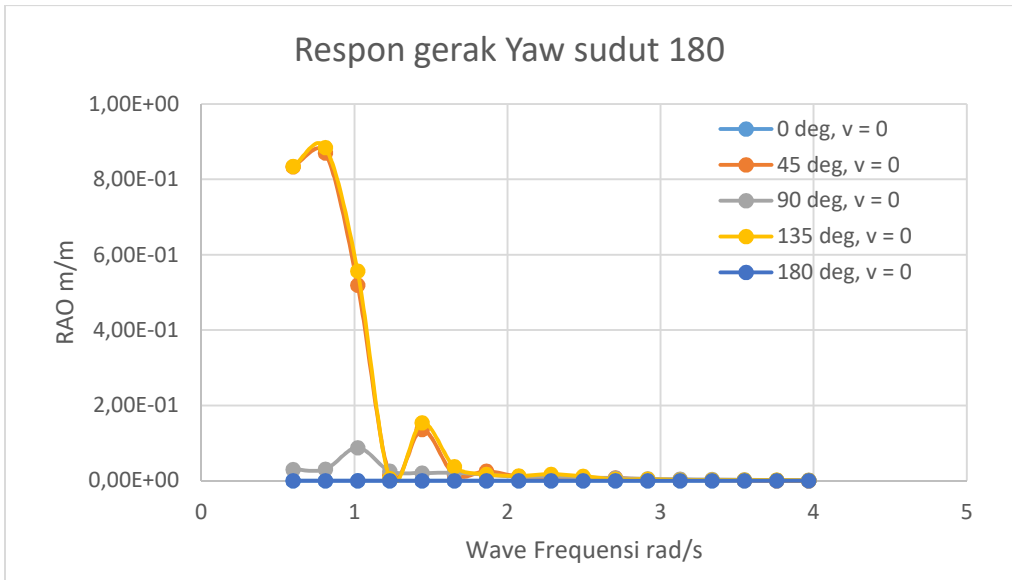
Berbeda dengan gerak *Sway*, nilai amplitudo gerak *Yaw* terbesar pada kecepatan 0 knot tidak terjadi pada sudut 90°, melainkan pada sudut datang gelombang miring 45° (*bow quartering*) dan 135° (*stern quartering*), dengan nilai maksimum mencapai 0,885 (Tanpa *Skeg*, 135°). Hal ini dikarenakan gelombang diagonal menciptakan distribusi tekanan tidak simetris antara haluan dan buritan sehingga menghasilkan lengan momen putar terhadap titik berat kapal. Modifikasi sudut *skeg* samping mampu menekan gerakan rotasi ini, di mana konfigurasi *Skeg* 160° paling efektif mereduksi gerak *Yaw* pada sudut datang 135° hingga menjadi 0,815.



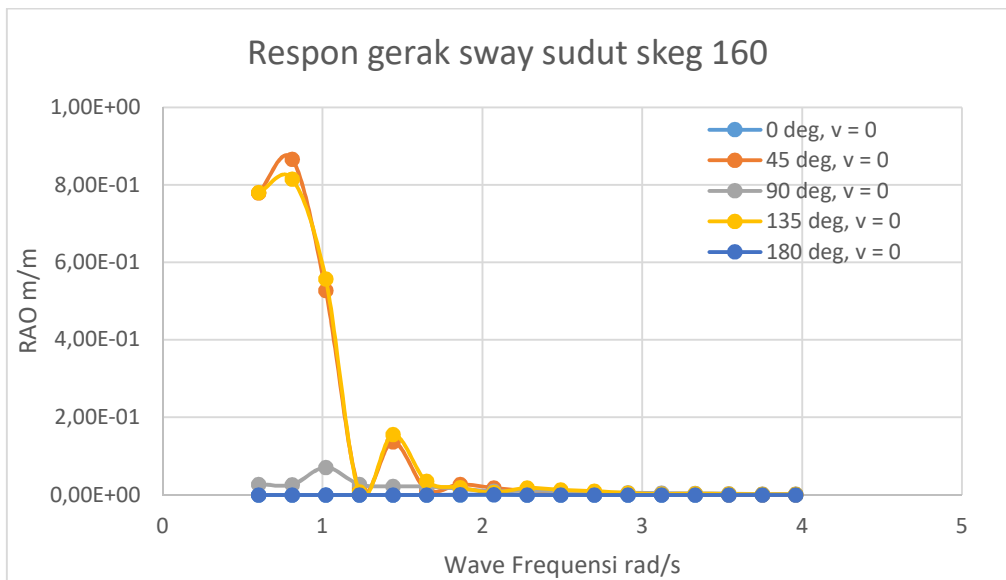
Gambar 4.28 Grafik RAO gerak *Yaw* tanpa *skeg* 0 knot

Berdasarkan grafik di atas, karakteristik respon gerak rotasi horizontal (*Yaw*) pada kondisi diam (0 knot) menunjukkan bahwa nilai amplitudo tertinggi terjadi pada sudut datang gelombang miring 45° (*bow quartering*) dan 135° (*stern quartering*). Hal ini terjadi karena gelombang diagonal menciptakan distribusi tekanan yang tidak simetris antara haluan dan buritan, sehingga menghasilkan momen putar terhadap titik berat kapal. Sebaliknya, respon gerak *Yaw* pada sudut 90° serta arah gelombang longitudinal (0° dan 180°) jauh lebih kecil atau hampir mendekati nol.

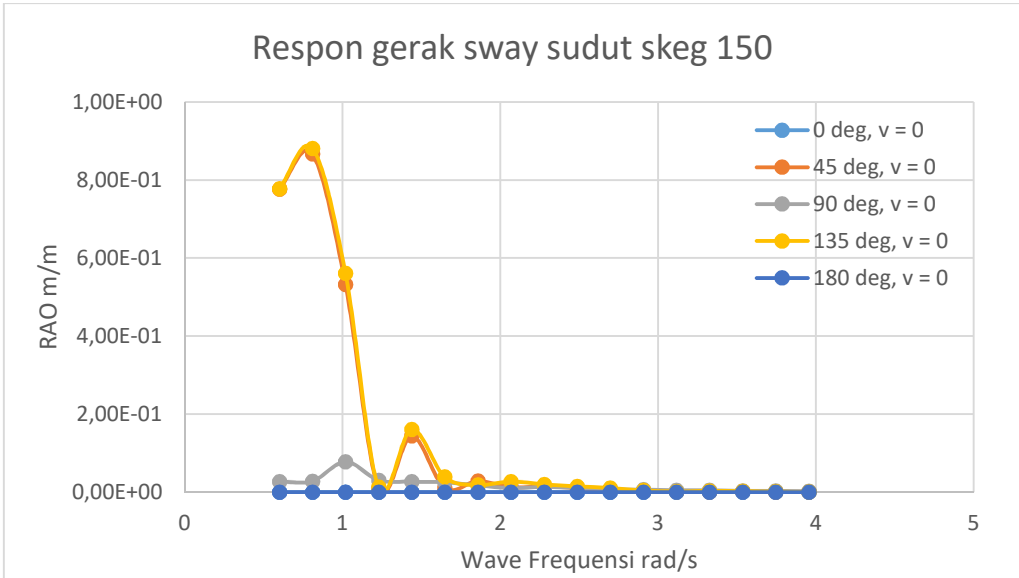
Kurva RAO *Yaw* tanpa *skeg* 0 knot memperlihatkan bahwa amplitudo respon mencapai puncaknya pada frekuensi rendah, sebelum akhirnya mengalami penurunan yang drastis. Pada frekuensi tinggi di atas 1,5 rad/s, seluruh kurva respon gerak *Yaw* melandai mendekati nilai nol. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi gelombang pendek dengan frekuensi tinggi, energi gelombang tidak lagi cukup efektif untuk menghasilkan momen puntir yang mampu merotasi massa lambung tongkang.



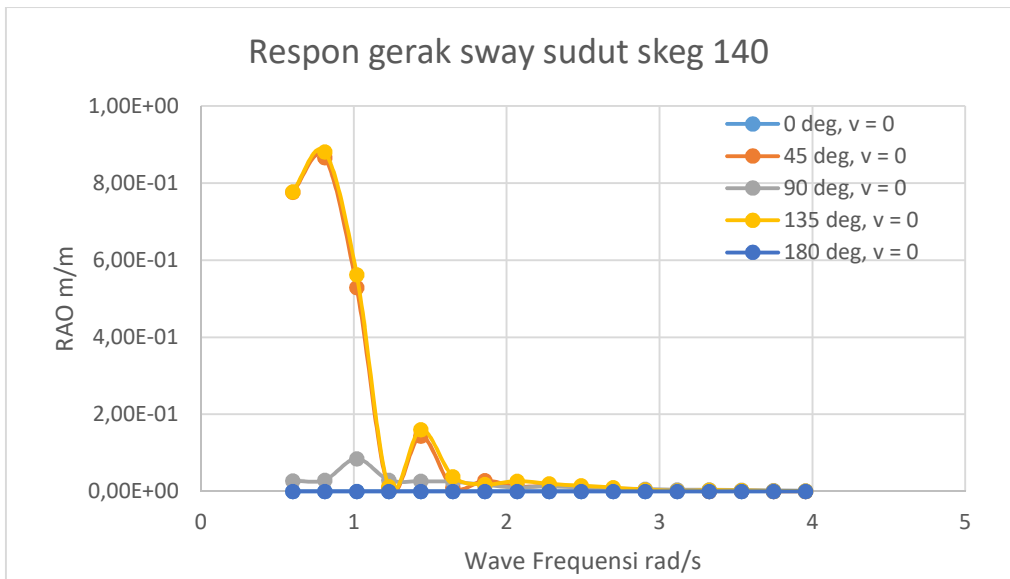
Gambar 4.29 Grafik RAO gerak Yaw sudut skeg 180 0 knot



Gambar 4.30 Grafik RAO gerak Yaw sudut skeg 160 0 knot



Gambar 4.31 Grafik RAO gerak Yaw sudut skeg 150 0 knot



Gambar 4.32 Grafik RAO gerak Yaw sudut skeg 140 0 knot

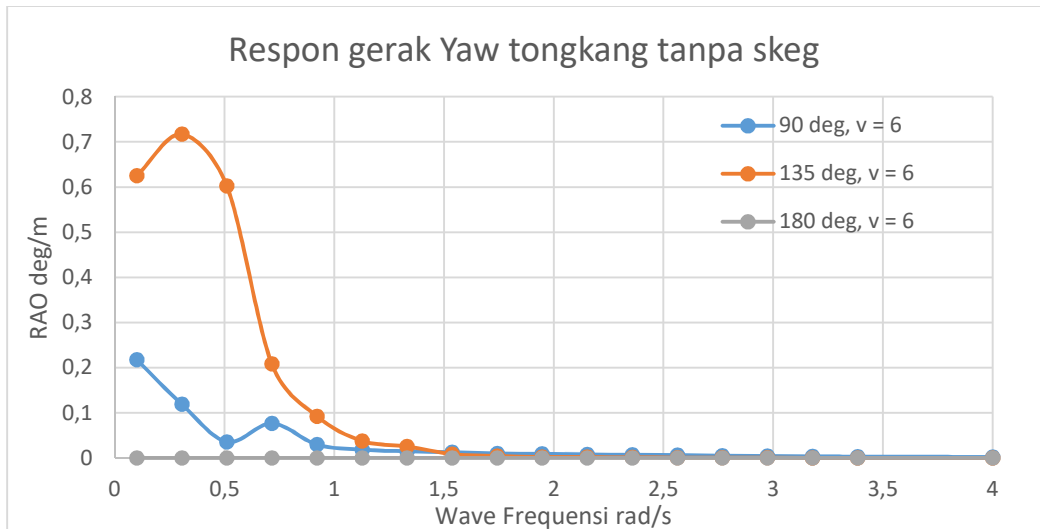
2) Kondisi Kecepatan 6 Knot

Analisis komparatif gerak *Yaw* pada kondisi kapal berkecepatan dinas disajikan melalui data Tabel dan Grafik di bawah ini.

Tabel 4.15 Respon gerak *Sway* pada kecepatan 6 knot

Variasi	90°	135°	180°
Tanpa <i>Skeg</i>	0,492 deg/m	0,885 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 180°	0,148 deg/m	0,705 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 160°	0,145 deg/m	0,702 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 150°	0,157 deg/m	0,682 deg/m	0,000 deg/m
<i>Skeg</i> 140°	0,157 deg/m	0,688 deg/m	0,000 deg/m

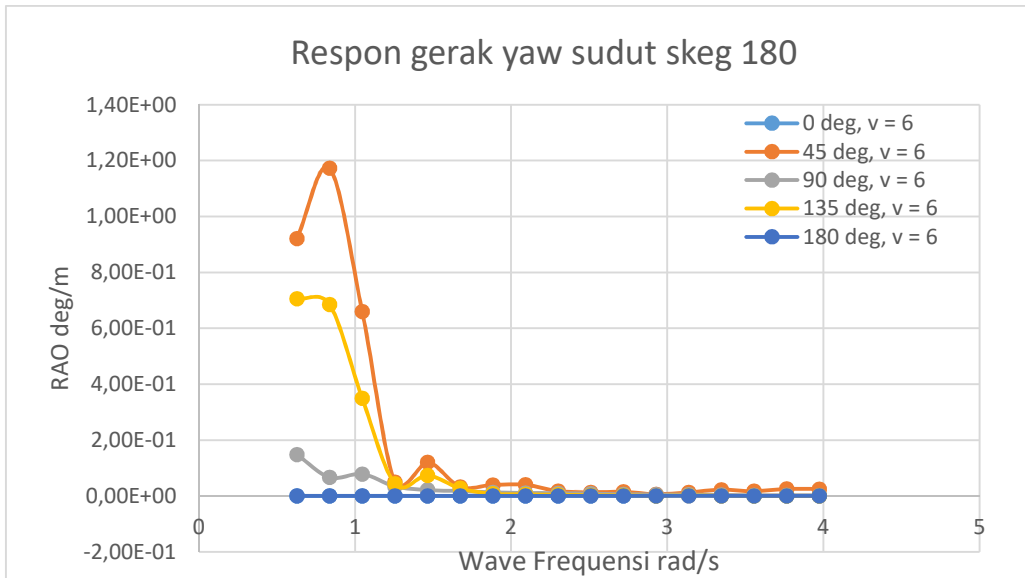
Penambahan komponen kecepatan maju (6 knot) memberikan dampak reduksi gerak *Yaw*, apabila lambung dipasangkan konfigurasi *triple skeg*. Pada sudut datang 90°, lambung Tanpa *Skeg* mencatat nilai *Yaw* sebesar 0,492, namun dengan adanya aplikasi *skeg*, nilai gerakan rotasi horizontal tersebut terpankaskan drastis hingga bersisa 0,145 - 0,157. Untuk gelombang miring 135°, konfigurasi *Skeg* 150° menghasilkan kestabilan arah paling tinggi dengan nilai respons terkecil (0,682).



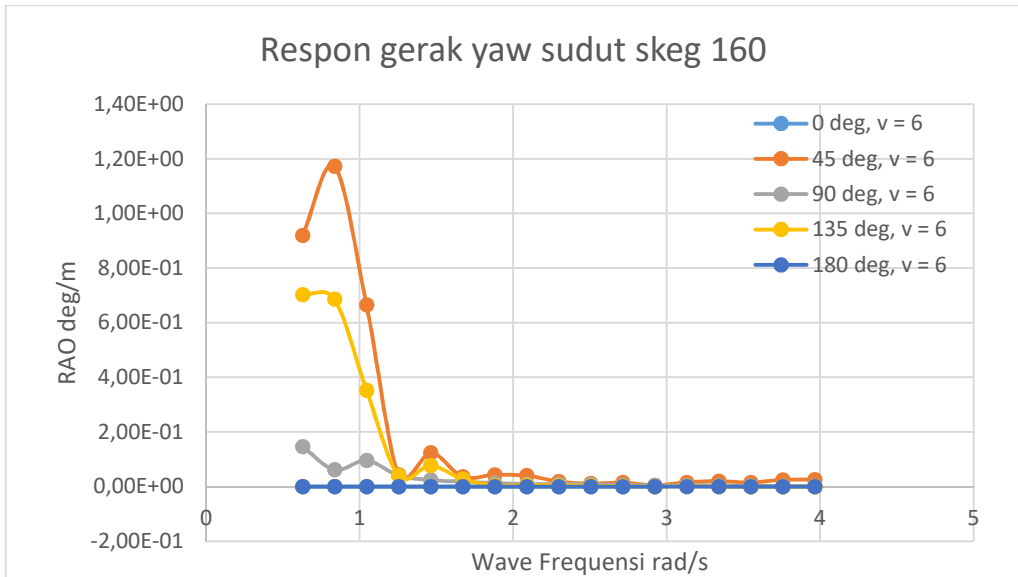
Gambar 4.33 Grafik RAO gerak *Yaw* tanpa *skeg* 6 knot

Berdasarkan Grafik di atas, karakteristik respon gerak rotasi horizontal (*Yaw*) pada kondisi kecepatan maju 6 knot menunjukkan bahwa nilai amplitudo tertinggi secara konsisten terjadi pada sudut datang gelombang 135° (*stern quartering*), yang ditunjukkan oleh kurva berwarna oranye. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi berkecepatan, gelombang yang datang dari arah 135° secara diagonal memberikan pengaruh momen puntir yang lebih besar terhadap tongkang dibandingkan dengan sudut datang lainnya. Sebaliknya, untuk arah gelombang longitudinal 180° (*head seas*), kurva respon gerak *Yaw* tetap berada pada nilai nol, yang menandakan tidak adanya eksitasi rotasi horizontal dari arah depan.

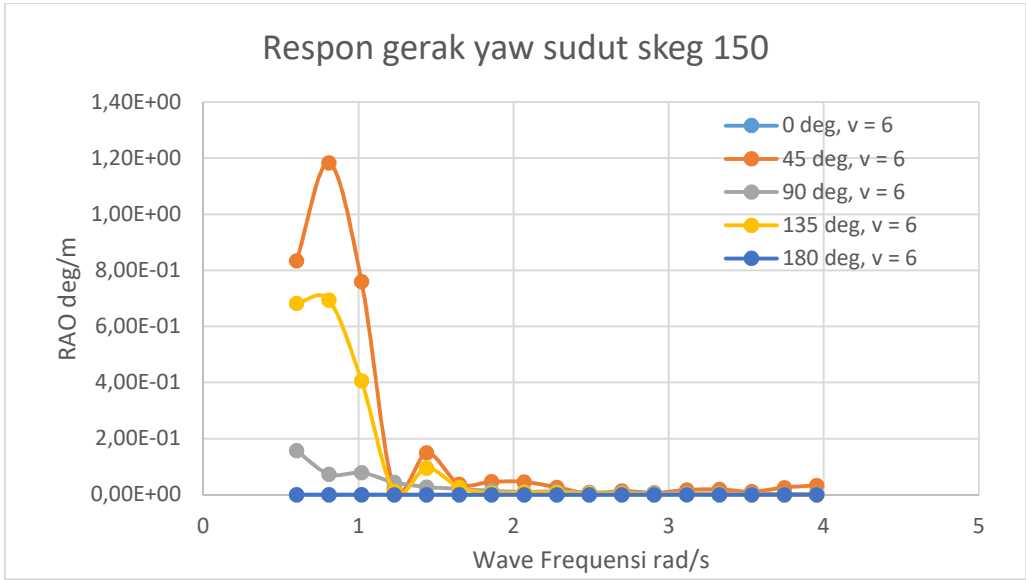
Pada grafik di atas, seluruh kurva respon menunjukkan penurunan setelah melewati titik puncak pada frekuensi rendah. Ketika mencapai frekuensi gelombang di atas 1,5 rad/s, nilai RAO pada seluruh variasi sudut datang mulai melandai mendekati nilai nol. Hal ini membuktikan bahwa pada kondisi gelombang pendek dengan frekuensi tinggi, energi gelombang tidak lagi menghasilkan momen yang mampu merotasi massa lambung tongkang secara horizontal saat kapal bergerak maju.



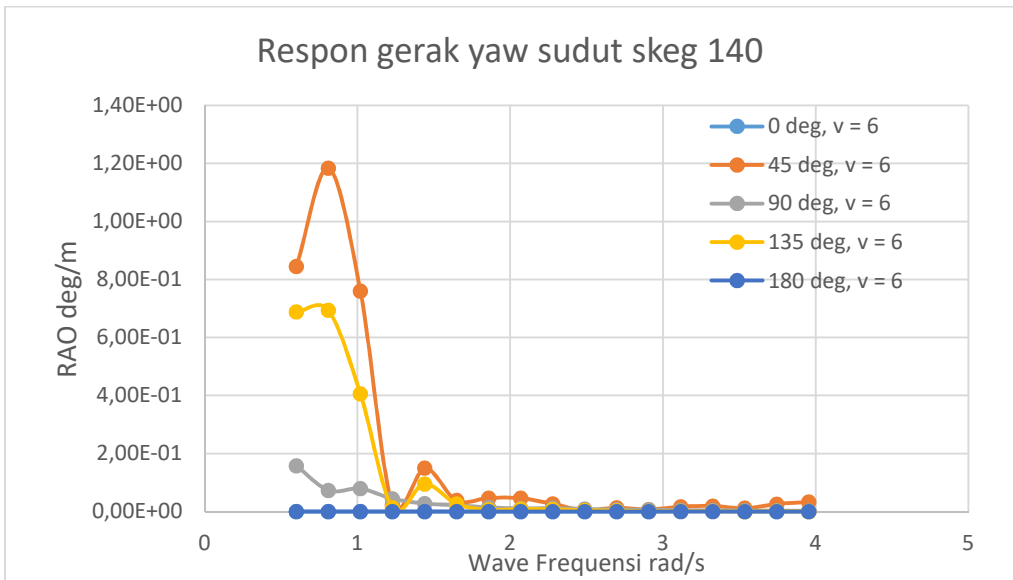
Gambar 4.34 Grafik RAO gerak Yaw sudut skeg 180 6 knot



Gambar 4.35 Grafik RAO gerak Yaw sudut skeg 160 6 knot



Gambar 4.36 Grafik RAO gerak *Yaw* sudut skeg 150 6 knot



Gambar 4.37 Grafik RAO gerak *Yaw* sudut skeg 140 6 knot

4.5 Pembahasan pengaruh *Skeg*

Berdasarkan hasil analisis hambatan dan olah gerak, penambahan *Skeg* pada Tongkang memberikan pengaruh terhadap perubahan nilai hambatan total dan respons gerak kapal terhadap gelombang. *Skeg* bekerja sebagai komponen tambahan pada bagian buritan yang dapat meningkatkan luas bidang lateral kapal, sehingga berperan dalam memperbaiki kestabilan arah, khususnya pada gerakan *Sway* dan *Yaw*. Namun, penambahan *Skeg* juga dapat menambah luas permukaan basah dan mengubah pola aliran di sekitar buritan lambung Tongkang, sehingga berpotensi meningkatkan hambatan total.

4.5.1 Analisis Komparatif Sudut *Skeg*

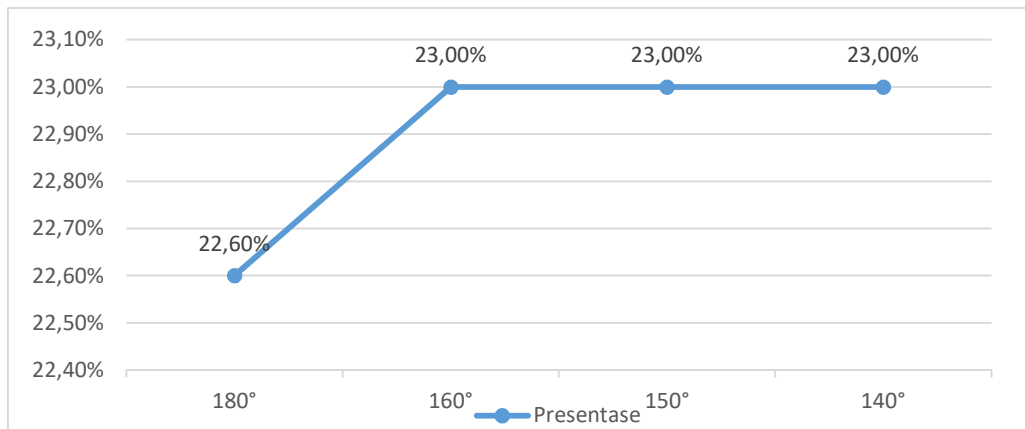
Analisis komparatif dilakukan dengan membandingkan kinerja seluruh variasi sudut *Skeg* (180° , 160° , 150° , dan 140°) terhadap tiga aspek, hambatan total, gerakan *Sway* dan *Yaw*. Perlu dipahami bahwa setiap variasi sudut memiliki keunggulan dan kekurangan masing-masing bergantung pada aspek apa yang diprioritaskan.

A. Hambatan Total

Seluruh variasi *Skeg* menyebabkan kenaikan hambatan dibandingkan kondisi tanpa *Skeg*. Presentase kenaikan hambatan rata-rata untuk masing masing variasi ada pada Tabel 4.

Tabel 4.16 Data presentase hambatan

Sudut <i>Skeg</i>	Presentase	Keterangan
180°	22,6 %	Hambatan paling kecil
160°	23,0 %	Naik sedikit
150°	23,0 %	Naik sedikit tapi tidak signifikan
140°	23,0 %	Naik sedikit tapi tidak signifikan



Gambar 4.38 Grafik presentase kenaikan hambatan

Pada tabel dan gambar di atas menyajikan data presentase kenaikan hambatan total akibat adanya variasi sudut *skeg* terhadap kondisi tanpa *skeg*. Dari data tersebut, diketahui bahwa nilai hambatan terkecil didapatkan pada sudut *skeg* 180° dengan presentase kenaikan hanya sebesar 22,60%.

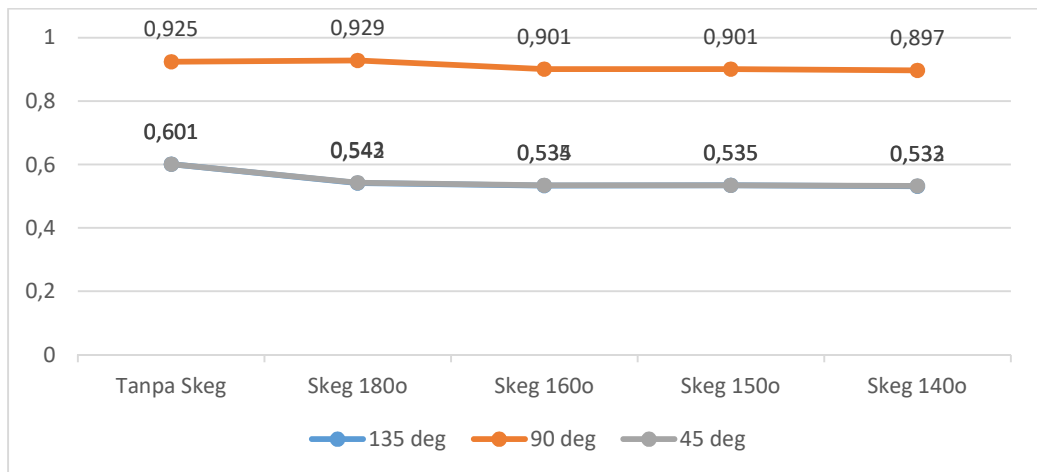
Pada sudut *skeg* 160°, nilai hambatan mengalami kenaikan tipis menjadi 23,00%. Grafik pada gambar 4.35 menunjukkan nilai yang cenderung konstan setelah sudut 160°, di mana pada variasi sudut 150° dan 140°, presentase kenaikan hambatan tetap berada di angka 1,74%. Hasil ini menunjukkan bahwa sudut diturunkan ke 160°, perubahan sudut *skeg* ke 140° tidak lagi memberikan pengaruh atau perubahan yang signifikan terhadap nilai hambatan total tongkang. Oleh karena itu, jika dilihat dari parameter hambatan total, sudut 180° merupakan variasi terbaik dengan dampak penambahan hambatan yang minim.

B. Olah Gerak *Sway* dan *Yaw*

Untuk menentukan desain optimum dari konfigurasi *triple skeg* yang diterapkan pada tongkang, maka diperlukan suatu analisis komparatif yang komprehensif antara tiap variasi sudut *skeg*. Pembahasan di bawah ini akan mengorelasi perubahan data yang dihasilkan pada grafik translasi *Sway* dan rotasi *Yaw* yang bertujuan untuk memvalidasi efisiensi masing-masing variasi sudut *skeg*.

Tabel 4.17 Respon gerak *Sway* 0 knot

Variasi	Tanpa <i>Skeg</i>	<i>Skeg</i> 180°	<i>Skeg</i> 160°	<i>Skeg</i> 150°	<i>Skeg</i> 140°
135°	0,601 m/m	0,542 m/m	0,534 m/m	0,535 m/m	0,532 m/m
90°	0,925 m/m	0,929 m/m	0,901 m/m	0,901 m/m	0,897 m/m
45°	0,601 m/m	0,543 m/m	0,535 m/m	0,535 m/m	0,533 m/m



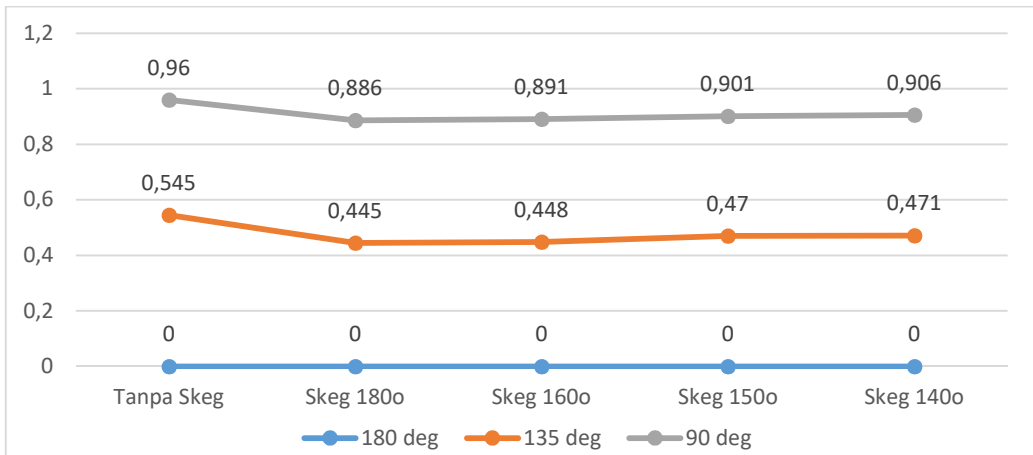
Gambar 4.39 Grafik respon *Sway* 0 knot di tiap sudut *skeg*

Grafik pada Gambar 4.39, memperlihatkan adanya kecenderungan penurunan amplitudo gerak *Sway* secara linear seiring memperkecilnya sudut variasi *skeg* dalam posisi diam (0 knot). Kurva gelombang 90° secara konsisten berada di posisi teratas karena menghasilkan respon gelombang paling besar dari arah samping lambung. Grafik tersebut melandai dan mencapai titik terendah pada konfigurasi *Skeg* 140°. Hal ini memperlihatkan bahwa pada kondisi sudut *Skeg* 140° menjadi yang paling efektif memberikan respon gerakan paling minimum. Sudut *skeg* ini optimal

dalam memerangkap massa tambah (*added mass*) fluida di sekitar buritan, sehingga menghasilkan tahanan inersia lateral yang lebih baik terhadap empasan gelombang.

Tabel 4.18 Respon gerak *Sway* 6 knot

Variasi	Tanpa <i>Skeg</i>	<i>Skeg</i> 180°	<i>Skeg</i> 160°	<i>Skeg</i> 150°	<i>Skeg</i> 140°
90°	0,960 m/m	0,886 m/m	0,891 m/m	0,901 m/m	0,906 m/m
135°	0,545 m/m	0,445 m/m	0,448 m/m	0,470 m/m	0,471 m/m

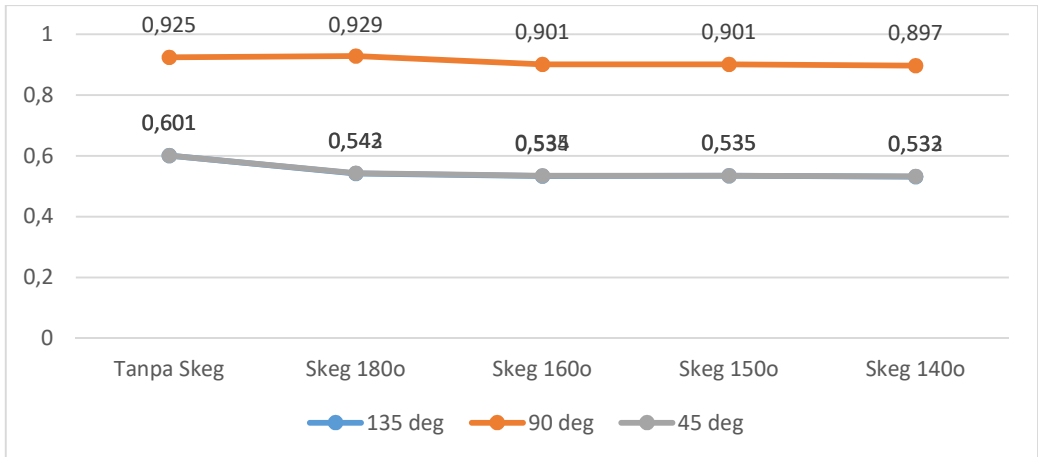


Gambar 4.40 Grafik respon *Sway* 6 knot di tiap sudut *skeg*

Grafik pada Gambar 4.40 memperlihatkan terjadinya pergeseran perilaku hidrodinamika gerak *Sway* yang cukup berbeda akibat pengaruh kecepatan maju tongkang sebesar 6 knot. Berbeda dengan kondisi tanpa kecepatan, kurva respons dinamis saat kapal bergerak ini membentuk pola cekungan. Titik koordinat gerakan paling minimum variasi *Skeg* 180°. Ketika sudut *skeg* samping dipersempit ke arah dalam (*Skeg* 160° hingga *Skeg* 140°), kurva respons lateral perlahan naik kembali. Ini mengindikasikan bahwa saat kapal memiliki kecepatan maju, posisi *skeg* lurus (180°) bekerja jauh lebih ideal dalam membelah aliran fluida di buritan tanpa memicu turbulensi berlebih ataupun hambatan samping.

Tabel 4.19 Respon gerak *Yaw* 0 knot

Variasi	Tanpa <i>Skeg</i>	<i>Skeg</i> 180°	<i>Skeg</i> 160°	<i>Skeg</i> 150°	<i>Skeg</i> 140°
135°	0,885 deg/m	0,884 deg/m	0,884 deg/m	0,881 deg/m	0,881 deg/m
90°	0,092 deg/m	0,087 deg/m	0,070 deg/m	0,027 deg/m	0,084 deg/m
45°	0,876 deg/m	0,870 deg/m	0,866 deg/m	0,866 deg/m	0,866 deg/m

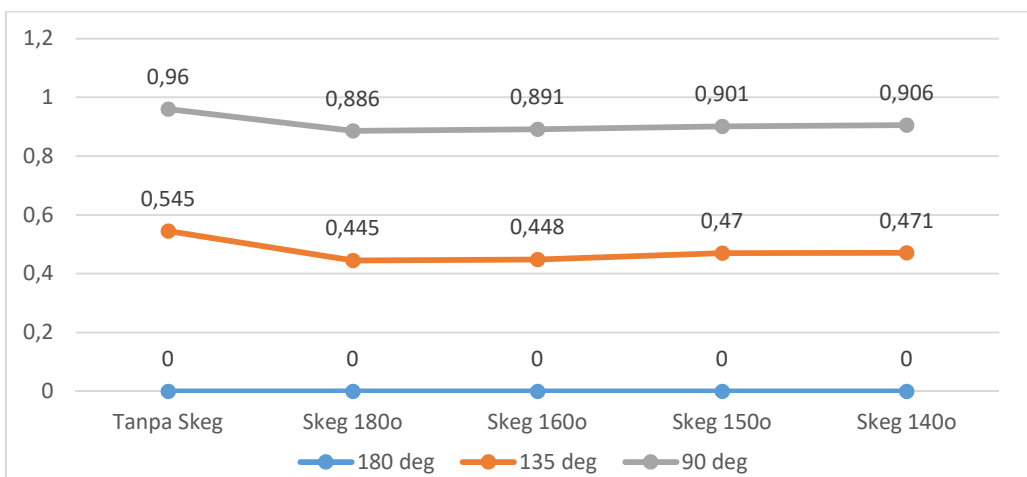


Gambar 4.41 Grafik respon Yaw 0 knot di tiap sudut skeg

Gambar 4.41 menyajikan komparasi kurva gerak rotasi horizontal (*Yaw*) pada kondisi kecepatan 0 knot, di mana respons gerakan memuncak pada sudut datang gelombang miring 45° dan 135°. kenaikan ini wajar terjadi karena gelombang miring lengan momen (*moment arm*) tidak simetris terhadap titik berat kapal. Hasil kurva ini menandakan bahwa sudut *Skeg* 150° merupakan konfigurasi batas terbaik untuk menyeimbangkan momen puntir sebelum nilainya kembali naik pada variasi *Skeg* 140°.

Tabel 4.20 Respon gerak Yaw 6 knot

Variasi	Tanpa Skeg	Skeg 180°	Skeg 160°	Skeg 150°	Skeg 140°
90°	0,492 deg/m	0,148 deg/m	0,145 deg/m	0,157 deg/m	0,157 deg/m
135°	0,885 deg/m	0,705 deg/m	0,702 deg/m	0,682 deg/m	0,688 deg/m



Gambar 4.42 Grafik respon Yaw 6 knot di tiap sudut skeg

Grafik pada Gambar 4.42 memvisualisasikan dampak yang sangat signifikan dari penambahan *triple skeg* sebagai stabilisator saat tongkang bergerak maju pada kecepatan 6 knot. Pada sudut datang gelombang miring 135° yang paling kritis, garis kurva menempatkan variasi *Skeg* 150° di posisi paling bawah grafik.

No.	Model	Kecepatan 0 knot (beam sea 90)	Kecepatan 0 knot (beam sea 135)	Kecepatana 6 knot (beam sea 90)	Kecepatan 6 knot (quartering 135)
1	Tanpa Skeg	0,925 m/m	0,601 m/m	0,960 m/m	0,545 m/m
2	Skeg 180°	0,920 m/m	0,542 m/m	0,886 m/m	0,445 m/m
3	Skeg 160°	0,901 m/m	0,534 m/m	0,891 m/m	0,448 m/m
4	Skeg 150°	0,901 m/m	0,535 m/m	0,901 m/m	0,470 m/m
5	Skeg 140°	0,897 m/m	0,532 m/m	0,906 m/m	0,471 m/m

No.	Model	Kecepatan 0 knot (beam sea 90)	Kecepatan 0 Knot (Quartering 135°)	Kecepatan 6 Knot (Beam Seas 90°)	Kecepatan 6 knot (quartering 135)
1	Tanpa Skeg	0,092 °/m	0,885 °/m	0,492 °/m	0,885 °/m
2	Skeg 180°	0,087 °/m	0,884 °/m	0,148 °/m	0,705 °/m
3	Skeg 160°	0,070 °/m	0,884 °/m	0,145 °/m	0,702 °/m
4	Skeg 150°	0,027 °/m	0,881 °/m	0,157 °/m	0,682 °/m
5	Skeg 140°	0,084 °/m	0,881 °/m	0,157 °/m	0,688 °/m

Gambar 4.43 Hasil keseluruhan nilai minimum Respon Gerak *Sway* dan *Yaw*

Berdasarkan tabel hasil keseluruhan pengujian olah gerak tongkang di atas, area yang ditandai dengan warna kuning menunjukkan nilai respons gerakan minimum atau terkecil yang mampu dicapai oleh masing-masing variasi sudut *side skeg*. Dalam analisis hidrodinamika dan *seakeeping*, nilai RAO (*Response Amplitude Operator*) yang semakin kecil atau minimum mengindikasikan bahwa lambung kapal memiliki kemampuan meredam gaya luar yang semakin baik, sehingga gerakan kapal menjadi lebih stabil.

Secara terperinci, pada gerakan translasi lateral (*Sway*) dengan arah gelombang 90° (*beam seas*), konfigurasi sudut 180° memang mencatatkan nilai respons terkecil sebesar 0,886 m/m. Namun, jika ditinjau pada kondisi gelombang diagonal dari arah belakang (135° atau *stern quartering seas*), gerakan rotasi horizontal (*Yaw*) menjadi parameter yang paling kritis dalam menjaga stabilitas arah tarikan tongkang agar tidak melenceng. Pada kondisi kritis inilah konfigurasi sudut 150° membuktikan keunggulannya dengan menghasilkan respons amplitudo gerakan *Yaw* terkecil dan paling minimum, yaitu sebesar 0,682 deg/m.

4.5.2 Pembahasan Rekomendasi Sudut *Skeg*

Berdasarkan hasil analisis komparatif menyeluruh terhadap seluruh variasi sudut, yaitu sudut 140° , 150° , 160° , dan 180° . Sudut 150° sudut skeg paling optimal untuk diimplementasikan pada lambung tongkang. Penentuan ini didasarkan di mana sudut 150° bertindak sebagai titik keseimbangan terbaik yang mampu mengakomodasi dua parameter uji utama secara bersamaan, yakni efisiensi hambatan total kapal (*Resistance*) dan kemampuan peredaman olah gerak *seakeeping* khususnya pada gerakan *Sway* dan *Yaw*.

Sudut kemiringan skeg yang terlalu landai seperti 140° terbukti kurang efektif dalam menghasilkan gaya angkat hidrodinamis (*hydrodynamic lift*) yang diperlukan untuk meredam gerakan translasi lateral (*swaying*) maupun rotasi horizontal (*yawing*) saat kapal mendapat gangguan gelombang luar. Sebaliknya, jika sudut ditingkatkan secara ekstrem mencapai 160° atau 180° , posisi skeg menjadi terlalu tegak atau menutup aliran air di area buritan. Kondisi tersebut memicu terjadinya pelepasan aliran air dari lambung dan memunculkan pusaran air sekunder yang besar di sisi dalam skeg. Fenomena ini bertindak layaknya penghambat yang melambungkan nilai koefisien hambatan total kapal secara drastis sehingga mengurangi efisiensi bahan bakar kapal tunda (tugboat) namun memberi arah tongkang tenang saat ditowing.

Oleh karena itu, variasi sudut 150° dipilih sebagai rekomendasi tunggal yang paling optimal karena memiliki desain kemiringan yang pas dan aliran air melewatinya dengan lancar tanpa menciptakan hambatan pusaran, namun tetap memiliki sudut yang cukup untuk membangkitkan momen pemulih hidrodinamis yang efektif guna menjaga meminimalkan respon gerak tongkang saat beroperasi di laut lepas.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”