

Analisa Tegangan pada *Cross Deck* Kapal Ikan Katamaran 10 GT Menggunakan Metode Elemen Hingga

Erik Chabibi, Totok Yulianto, I Ketut Suastika
Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: totoky@na.its.ac.id

Abstrak—Dalam bidang kekuatan kapal, perlu memperhitungkan kekuatan memanjang dan melintang suatu konstruksi kapal. Distribusi beban yang tidak merata dan gelombang air laut yang tidak beraturan dan berulang pada kapal yang berlayar menyebabkan struktur kapal terjadi tegangan dan regangan. Kapal katamaran (*multi hull*) merupakan inovasi untuk kemajuan sarana transportasi laut dalam rangka memajukan ilmu pengetahuan dan teknologi. Tujuan penelitian ini membuktikan bahwa tegangan yang dihasilkan oleh kapal ini saat terkena beban gelombang dengan variasi arah gelombang 0^0 (*following sea*), 90^0 (*beam sea*) dan 180^0 (*head sea*) memenuhi tegangan ijin standar BKI (Biro Klasifikasi Indonesia). Pada kapal katamaran terjadi kombinasi beban gaya hidrostatik dan hidrodinamis (gelombang) yang menyebabkan terjadi momen bending dan gaya geser. Untuk mengetahui tegangan Von Mises maksimum yang terjadi dilakukan analisa dengan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan bantuan *software* MSC Nastran 2010. Hasil perhitungan analisa manual didapatkan nilai tegangan terbesar pada arah gelombang 180^0 (*head sea*) sebesar $9,389 \text{ N/mm}^2$. Sedangkan hasil pemodelan dengan menggunakan metode elemen hingga didapatkan tegangan maksimum terjadi pada arah gelombang 90^0 (*beam sea*) sebesar $33,2 \text{ N/mm}^2$. Tegangan ijin yang disyaratkan oleh BKI sebesar $39,311 \text{ N/mm}^2$. Dari hasil analisa tegangan tersebut, struktur kapal ikan katamaran memenuhi standar dari ketentuan BKI.

Kata Kunci : Katamaran, Elemen Hingga, Gelombang Reguler, Tegangan

I. PENDAHULUAN

SEMAKIN berkembangnya penelitian yang dilakukan terhadap kapal dengan jenis katamaran yang lebih menitik beratkan terhadap desain lambung (*hull*) yang bertujuan mendapat *performance* kapal yang baik tanpa mengedepankan segi kekuatan struktur kapal tersebut. Sehingga kemungkinan dari segi kekuatan struktur kapal tidak diketahui apakah sudah sesuai standar perhitungan kekuatan kapal atau melebihi standar. Kapal yang diteliti merupakan kapal dengan ukuran kecil sehingga kurang adanya aturan khusus mengenai kapal tipe katamaran yang merupakan tipe *special craft* yang mengatur dari segi kekuatan struktural kapal. Sehingga dari segi kekuatan kurang diperhatikan. Berbagai bentuk kapal

kemudian dikembangkan untuk memenuhi kriteria desain kapal di atas. Di antara berbagai bentuk yang ada, maka konsep kapal katamaran yang paling banyak dipilih dan mendapatkan perhatian, karena sejumlah kelebihanannya antara lain memiliki luasan geladak yang lebih besar dan stabilitas melintang yang lebih baik dibandingkan kapal berbadan tunggal [1].

Moda gerak kebebasan yang dibahas adalah gerakan yang paling dominan untuk studi kasus ini yaitu *heaving* dan *pitching*. Untuk gerakan *heaving* dan *pitching* dapat digabungkan menjadi satu gerakan *couple* biasa disebut dengan *couple heave-pitch* [2]. Diambil 3 arah datang gelombang yang berbeda, yaitu *head sea* (0^0), *beam sea* (90^0) dan *following sea* (180^0) yang mempunyai pengaruh besar dalam gerakan *heaving* dan *pitching*. Dengan 3 arah datang gelombang yang berbeda dapat dibandingkan dari arah mana gelombang yang paling mempengaruhi kekuatan kapal.

II. URAIAN PENELITIAN

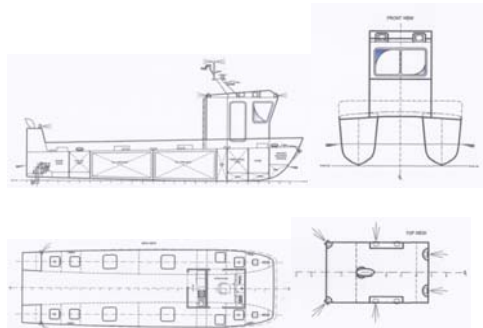
Analisa dimulai dengan pengumpulan data yang diperlukan untuk penelitian seperti data dimensi utama kapal katamaran dan data lingkungan (gelombang). Dari data yang diperoleh, dilakukan perhitungan gerakan kapal akibat *couple heave pitch*. Selanjutnya adalah menghitung *bending moment* dan *shear force* akibat *couple heave pitch* menggunakan metode *strip theory*. Bending momen dari perhitungan digunakan untuk menentukan tegangan. Tegangan dihitung dengan dua cara yaitu menggunakan metode analitik (*hand calculation*) dan menggunakan pemodelan elemen hingga. Selanjutnya dari tiap-tiap perhitungan akan dibandingkan dengan tegangan ijin sesuai standar klasifikasi.

A. Pengumpulan Data dan Material Properties

Studi kasus untuk penelitian ini adalah kapal ikan katamaran 10 GT yang beroperasi di daerah pantai utara Jawa. Data-data yang diperoleh berupa *Lines plan*, *General Arrangement* dan *Construction Profile*. Ukuran utama kapal katamaran diberikan pada tabel 1 dengan *general arrangement* pada gambar 1.

Tabel 1. *Principal Dimension Katamaran*

Description	Symbol	Unit	Quantity
Length Overall	LOA	m	12.90
Length Between Perpendicular	LPP	m	11.85
Breadth	B	m	4.00
Depth	D	m	1.50
Draft	T	m	0.70
Service Speed	Vs	knots	8.00
Koefisien Block	Cb		0.537



Gambar. 1. *General Arrangement* kapal ikan katamaran 10 GT

Tabel 2. Tabel material properties Aluminium 5083

Density	2650 kg/m ³
Melting Point	570° C
Modulus of elasticity	72 GPA
Proof Stress 0.2% (Mpa)	145
Tensile Strength (Mpa)	300
Shear Strength (Mpa)	175
Elongation A5 (%)	23

Pada pemodelan penelitian ini material yang digunakan adalah aluminium yang banyak digunakan dalam bidang konstruksi perkapalan. Aluminium yang digunakan disini adalah AL 5083 dengan material properties pada tabel 2 [3] :

B. Coupled Heaving and Pitching Motions

Dalam buku *Dynamics of Marine Vehicles* menurut *Bhattacharyya* persamaan untuk *heave-pitch motion* dituliskan dalam :

$$(m + a_z) \ddot{z} + b\dot{z} + cz + d\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + h\theta = F(t) \dots\dots(1)$$

$$(I_{yy} + A_{yy}) \ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{z} + Ez + Hz = M(t) \dots\dots(2)$$

Keterangan :

- m = massa kapal (ton)
- a_z = *added mass heaving*
- b, B = *damping coefficient* untuk *heaving, pitching*
- c_n, C = *restoring force coefficient heaving, pitching*
- d, D = *inertial moment coefficient heaving, pitching*
- e, E = *damping moment coefficient heaving, pitching*
- F = *exciting force*

- I_{yy} = momen inersia kapal
- A_{yy} = *added mass pitching*
- M = *exciting moment*

Langkah selanjutnya adalah menghitung komponen-komponen hidrodinamis sampai didapatkan persamaan untuk gerakan *couple heaving* dan *pitching*, yang dituliskan dalam persamaan :

$$Heave : z = z_a \cos(\omega_e t + \delta) \dots\dots\dots(3)$$

$$Pitch : \theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon) \dots\dots\dots(4)$$

C. Bending moment akibat gerakan *couple heaving pitching*

Ada 3 jenis bending momen pada kapal yang terjadi di lautan, yaitu :

1. *Vertical bending moment*, menghasilkan defleksi kearah sumbu y
2. *Horizontal bending moment*, menghasilkan defleksi kearah sumbu z
3. *Transversal bending moment*, menghasilkan defleksi kearah sumbu x

Pada kapal katamaran, kombinasi gaya hidrostatis dan hidrodinamis menghasilkan *bending moments* yang begitu signifikan pada bidang *transversal*. Setiap masing-masing *bending moment* terdiri dari penjumlahan tiga komponen, yaitu :

1. Perbedaan distribusi berat dan gaya angkat (*buoyancy*) pada air tenang.
2. Gelombang yang ditimbulkan akibat gerakan kapal pada air tenang.
3. Gelombang yang berada dibawah permukaan air laut.

Ketiga komponen di atas ketika dijumlahkan akan menghasilkan *total bending moment* [4]. Pada point kedua dan ketiga disebut dengan *wave bending moment*. Bending momen total M, terdiri dari penjumlahan dua momen yang berbeda,

$$M = M_s + M_w$$

Dimana : M_s = bending momen pada *still water*

M_w = *wave bending moment*

$$M_w = M_\zeta + M_z + M_\theta$$

M_ζ = momen akibat gelombang

M_z = momen akibat gerakan *heaving*

M_θ = momen akibat gerakan *pitching*

Persamaan umum untuk *vertical bending moment* adalah :

$$m(x) = \int_0^x f(x,t) dx = m_o \cos(\omega_e t + \beta) \dots\dots\dots(5)$$

dimana m_o adalah amplitudo dari bending momen.

Persamaan umum untuk *shear force* adalah :

$$f = f_1 \cos \omega_e t + f_2 \sin \omega_e t = f_o \cos (\omega_e t + \alpha) \dots\dots\dots(6)$$

dimana f_o adalah amplitudo dari gaya geser [4].

Tabel 3. Bending momen akibat *couple heave pitch*

Heading angle	Bending momen (ton.m)
0°	0,2796455
90°	1,146
180°	0,4946665

Tabel 4. Modulus penampang geladak

Modulus penampang (arah memanjang kapal)	516,84 cm ³
Modulus penampang (arah melintang kapal)	1811,77 cm ³

Tabel 5. Response gerakan *heave* untuk kecepatan 8 knots

Statistik	Arah datang gelombang (degree)		
	0°	90°	180°
Frek. enco. (rad/s)	0,141	2,235	4,327
Amplitudo (z) max. (ft)	2,214	0,14	0,746
Sudut fase (δ) (degree)	7,432	81,66	17,543

Tabel 6. Response gerakan *pitch* untuk kecepatan 8 knots

Statistik	Arah datang gelombang (degree)		
	0°	90°	180°
Frek. enco. (rad/s)	0,141	2,235	4,327
Amplitudo (θ) max. (ft)	0,163	0,065	0,077
Sudut fase (δ) (degree)	177,9	188,2	96,968

Tabel 7 Tabulasi *shear force* dan *bending moment*

Statistik	Arah datang gelombang		
	0°	90°	180°
Frekuensi encounter. (rad/s)	0,141	2,235	4,327
Bending momen amplitude (m ₀) [lb.ft]	2022,65	8291,516	4694,83
Shear force amplitude (f ₀) [lb.ft]	175,387	187,080	259,365
Sudut fase bending momen (β) [degree]	78,255	134,231	-65,625
Sudut fase shear force (α) [degree]	77,566	8,868	21,0

Tabel 8. Hasil perhitungan tegangan menggunakan analisa manual

Arah Gelombang	Tegangan (N/mm ²)
0°	5,308
90°	6,207
180°	9,389

D. Perhitungan tegangan menggunakan analisa manual (hand calculation)

Dalam perhitungan analisa manual ini, perhitungan tegangan menggunakan persamaan umum dari tegangan yaitu :

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [N/mm^2]$$

dimana,

M = momen bending pada kapal (ton.m)
 W = modulus penampang melintang kapal (cm³)

Untuk nilai dari bending momen dan modulus penampang dapat dilihat pada tabel 3 dan 4.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil perhitungan *coupled heaving and pitching motions*

Berikut hasil perhitungan untuk response motion akibat *couple heave pitch* kapal katamaran dengan variasi tiga arah gelombang yang disajikan dalam bentuk tabel yaitu pada tabel 5.

Dari tabel diatas dapat kita lihat bahwa untuk gerakan *heave*, amplitudo terbesar terjadi pada arah gelombang 0° (*following sea*). Sedangkan untuk gerakan *pitch*, amplitudo terbesar terjadi ketika arah gelombang 0° (*following sea*). Untuk arah gelombang 90° (*beam sea*) memiliki amplitudo yang lebih landai daripada arah gelombang 180° (*head sea*).

B. Hasil perhitungan *shear force* dan *bending moment* akibat *coupled heave pitch*

Parameter utama yang digunakan sebagai input utama dalam menghitung bending moment dan shear force menggunakan metode *strip theory* adalah amplitudo dan sudut fase (*phase angle*) dari setiap gerakan. Berikut merupakan ringkasan dari perhitungan *bending momen* dan *shear force* dengan variasi tiga arah gelombang yang disajikan dalam bentuk tabel.

Tabel Hasil perhitungan tegangan menggunakan analisa manual (hand calculation)

Seperti dijelaskan sebelumnya, bahwa perhitungan tegangan secara manual menggunakan persamaan umum tegangan yaitu :

$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [N/mm^2]$$

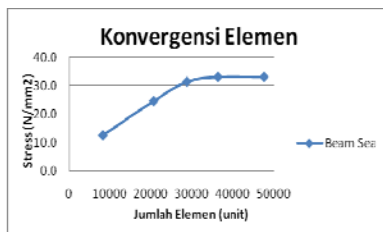
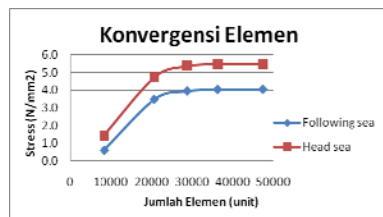
Sehingga hasil perhitungan tegangan secara manual pada geladak untuk tiap arah gelombang dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 9. Tabulasi Perbandingan Jumlah Elemen

No.	Maksimum		
	0° (following sea)		
	Jumlah Elemen	Stress (N/mm ²)	Node
1.	8253	0,602	5239
2.	20564	3,480	5070
3.	28671	3,957	5187
4.	36252	4,040	5066
5.	47453	4,048	2091

No.	Maksimum		
	90° (beam sea)		
	Jumlah Elemen	Stress (N/mm ²)	Node
1.	8253	12,580	42592
2.	20564	24,642	37651
3.	28671	31,488	40723
4.	36252	33,200	42656
5.	47453	33,206	43125

No.	Maksimum		
	180° (head sea)		
	Jumlah Elemen	Stress (N/mm ²)	Node
1.	8253	1,446	5105
2.	20564	4,736	5391
3.	28671	5,378	5386
4.	36252	5,490	5066
5.	47453	5,501	2354



Gambar. 2. Konvergensi Elemen

C. Hasil perhitungan tegangan menggunakan analisis elemen hingga

a. Konvergensi elemen

Untuk pemodelan dengan menggunakan elemen hingga, perlu dilakukan konvergensi elemen untuk mengetahui proses pengerjaan model kita benar atau minimal mendekati nilai kebenaran. Pada penelitian ini dilakukan konvergensi elemen dengan perbedaan jumlah elemen. Dengan pembebanan yang sama didapatkan hasil running yang berbeda untuk tiap jumlah elemen. Hasil analisa yang digunakan adalah saat nilai tegangan bernilai maksimal atau sama untuk tiap-tiap jumlah elemen yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa model yang telah kita buat mempunyai keakuratan yang baik. Untuk variasi dari jumlah elemen dapat dilihat pada tabel dibawah :

Sehingga dapat dinyatakan dalam grafik sebagai berikut :

D. Pemodelan menggunakan MSC Nastran

Pada pemodelan menggunakan Nastran, kondisi batas atau *boundary condition* ditentukan oleh regulasi RINA 2010, dimana untuk pemodelan empat kompartemen bagian ujung dari model diberi kondisi jepit atau *fix*. Pada penelitian ini, kondisi batas disesuaikan dengan datangnya gelombang. Untuk gelombang 0° dan 180°, bagian yang diberi kondisi batas adalah pada bagian tengah penampang melintang model karena sumbu putar kapal untuk kedua arah gelombang tersebut adalah sumbu-y. Sedangkan untuk arah gelombang 90°, bagian yang di *constraint* adalah pada penumpu tengah geladak sepanjang kapal, karena sumbu putar kapal adalah sumbu-x.

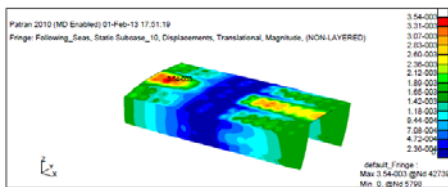
Untuk pembebanan pada model input beban yang digunakan adalah perbedaan gaya angkat dan gaya berat (superposisi) dengan kondisi batas sesuai dengan penjelasan sebelumnya, maka akan dilakukan analisis terhadap tegangan (Von Mises) dari tiap model disetiap arah datang gelombang, hal itu bertujuan untuk mengetahui berapa besar tegangan yang terjadi pada model katamaran serta mengetahui nilai tegangan terbesar sehingga nanti bisa diketahui diterima atau tidaknya sistem konstruksi kapal yang dipakai sesuai dengan ketentuan klasifikasi [1].

Berikut merupakan perbedaan distribusi gaya berat dan gaya angkat :

Tabel 10. Resultant gaya berat dan gaya angkat

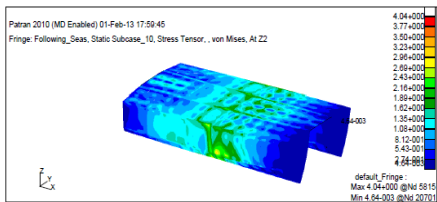
Statio n	Gaya berat (ton/m)	Gaya angkat (ton/m)	Superposi i (ton/m)
0-1	-0,938	0,00	-0,94
1-2	-1,196	0,00	-1,20
2-3	-1,352	0,05	-1,30
3-4	-1,158	1,06	-0,10
4-5	-0,944	2,10	1,16
5-6	-0,869	2,63	1,76
6-7	-0,952	2,26	1,31
7-8	-0,855	1,23	0,38
8-9	-0,752	0,16	-0,59
9-10	-0,410	0,00	-0,41

- a. Arah gelombang 0° (*following sea*)
 - Deformasi terjadi pada tengah geladak sebesar 0,00354 mm



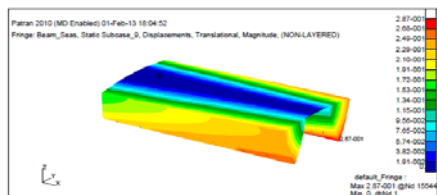
Gambar . 3. Deformasi pada geladak untuk arah gelombang 0° (*following sea*)

- Tegangan maksimal sebesar 4,04 N/mm².



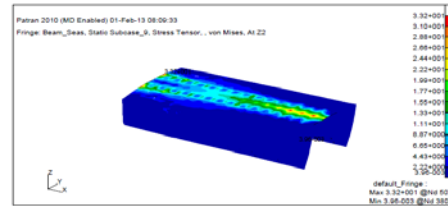
Gambar. 4. Hasil tegangan Von Mises untuk arah gelombang 0° (*following sea*)

- b. Arah gelombang 90° (*beam sea*)
 - Deformasi terjadi pada bagian samping kapal sebesar 0,287 mm



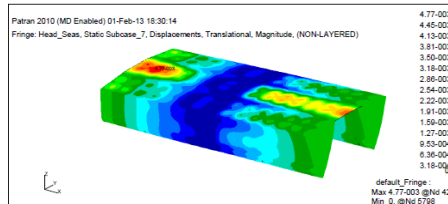
Gambar. 5. Deformasi pada geladak untuk arah gelombang 90° (*beam sea*)

- Tegangan maksimal sebesar 33,2 N/mm².



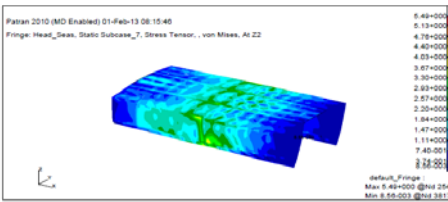
Gambar. 6. Hasil tegangan Von Mises untuk arah gelombang 90° (*beam sea*)

- c. Arah gelombang 180° (*head sea*)
 - Deformasi terjadi pada bagian tengah kapal sebesar 0,00477 mm



Gambar. 7. Deformasi pada geladak untuk arah gelombang 180° (*head sea*)

- Tegangan maksimal sebesar 5,49 N/mm².

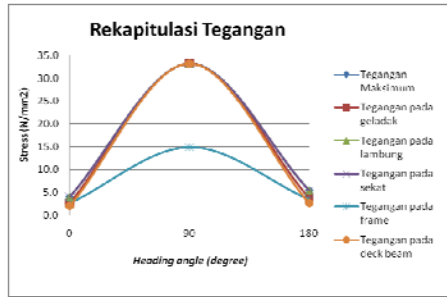


Gambar. 8. Hasil tegangan Von Mises untuk arah gelombang 180° (*head sea*)

Tabel 11. Tegangan Von mises pada tiap-tiap bagian kapal

Arah Gelombang	Stress (N/mm ²)			
	Max.	Deck	Hull	Frame
0°	4,04	2,69	4,04	2,63
90°	33,2	33,2	33,2	14,9
180°	5,49	3,78	5,49	3,49

Adapun hasil tegangan dari tiap arah gelombang dapat dilihat pada gambar 3, 4, 5, 6, 7, dan 8. Selain hasil di atas, analisa tegangan juga dilakukan pada tiap bagian dari kapal katamaran yang sudah dirangkum pada tabel 11:



Gambar. 9. Hasil tegangan tiap-tiap bagian kapal katamaran

Tabel 12. Komparasi data

Heading angle	Stress (N/mm ²)			
	Analisa manual	Analisa FEM	Standar klasifikasi	Check
0°	5,308	4,04	39,311	✓
90°	6,207	33,2	39,311	✓
180°	9,389	5,49	39,311	✓

Keterangan : ✓ = memenuhi
 X = tidak memenuhi

Dapat dilihat pada grafik, perbedaan tegangan untuk tiap arah gelombang pada tiap-tiap bagian kapal katamaran. Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa tegangan terbesar terjadi pada arah gelombang 90°.

E. Perhitungan tegangan ijin

Tegangan ijin (*allowable stress*) yaitu bagian kekuatan batas yang bisa aman digunakan pada perancangan [5] Regulasi yang digunakan untuk tegangan ijin adalah BKI (Biro Klasifikasi Indonesia) Vol. II tahun 2008. Untuk BKI batas minimum tegangan tidak boleh lebih dari persyaratan berikut ini:

$$\sigma_p = cs \cdot \sigma_o \quad (N/mm^2)$$

dimana,

$$\sigma_o = 18.5 \quad \text{untuk } L < 90 \text{ m}$$

$$cs = 1.0 \quad \text{untuk } 0.3 \leq \frac{x}{L} \leq 0.7$$

Sesuai dengan regulasi BKI 2008, batas penerimaan tegangan normal pada konstruksi suatu kapal yang dilakukan pengujian adalah sebagai berikut:

$$\sigma_1 \leq \sigma_p, A_{II}$$

dimana,

σ_1 = tegangan normal yang terjadi pada konstruksi kapal

σ_p, A_{II} = tegangan yang diijinkan, didapatkan dengan ketentuan $\sigma_p = cs \cdot \sigma_o$ (N/mm²) [6].

$$k = 1,62$$

$$\sigma_o = 39,311 \text{ N/mm}^2$$

$$cs = 1,0 \quad \text{untuk daerah midship}$$

Tegangan ijin yang disyaratkan oleh BKI adalah :

$$\sigma_p = cs \cdot \sigma_o$$

$$= 1,0 \cdot 39,311 = 39,311 \text{ N/mm}^2$$

sehingga $\sigma_p, A_{II} = 39,311 \text{ N/mm}^2$ struktur konstruksi kapal bagian midship yang menggunakan baja outokumpu akan memenuhi tegangan normalnya jika tegangan normal (σ) $\leq 39,311 \text{ N/mm}^2$.

F. Komparasi Data

Dengan mengetahui tegangan maksimum pada kedua perhitungan (manual dan elemen hingga), langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil tegangan kedua perhitungan dengan tegangan ijin sesuai standar klasifikasi. Sehingga dapat diketahui diterima atau tidaknya struktur konstruksi kapal katamaran. Hasil komparasi dapat dilihat pada tabel sebagai berikut :

IV. KESIMPULAN

1. Momen bending terbesar dialami oleh kapal dengan arah datang gelombang 90° (*head sea*) dengan nilai momen bending sebesar 1,146 ton.m dan menghasilkan tegangan pada kapal sebesar $\sigma = 6,207 \text{ N/mm}^2$.
2. Pada analisa dengan perhitungan manual, untuk arah datang gelombang 180° (*head sea*) mengakibatkan terjadi tegangan maksimum sebesar $\sigma_{max} = 9,389 \text{ N/mm}^2$, sedangkan pada analisa dengan menggunakan pemodelan elemen hingga, tegangan terbesar terjadi pada arah gelombang 90° (*beam sea*) sebesar 33,2 N/mm². Tegangan ijin yang disyaratkan oleh BKI sebesar 39,311 N/mm² yang berarti bahwa struktur tersebut memenuhi tegangan ijin dari ketentuan BKI.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Huda dan Budie Santoso, "Analisa Perkiraan Umur Struktur Pada Kapal Ikan Katamaran 10 GT Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 1, No. 1 (Sept. 2012) G 311-316.

[2] E. Rizki Ilma, "Analisa Kekuatan Struktur Antara Deck dan Lambung Bagian dalam Kapal Katamaran," Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2011).

[3] S. H. Perdana, "Analisa Tegangan Geser Pada Struktur Melintang Kapal Ikan Katamaran 10 GT dengan Bahan Aluminium," Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2012).

[4] *Dynamics of Marine Vehicles*. Maryland: A wiley Interscience Publication.

[5] Jensen, Alfred & Che, *Kekuatan Bahan Terapan*, Jakarta. Erlangga (1991).

[6] *Volume II Hull Construction*, Biro Klasifikasi Indonesia (2008).