

ANALISA KEKUATAN KONSTRUKSI RUANG MUAT KAPAL *SELF PROPELLED OIL BARGE* SALRA 115 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA LINEAR DAN NONLINEAR

Akhmad Syarif Zulfikar¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Berlian A. A¹⁾

¹⁾Jurusan S1 Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Email : akhmadsyarifz@student.undip.ac.id

Abstrak

SPOB Salra 115 adalah kapal konversi dari kapal LCT Berlian Samudra. Konversi *Landing Craft Tank* menjadi *Self Propelled Oil Barge* dilakukan karena LCT tidak dapat digunakan sebagai sarana pengangkut minyak karena tidak memenuhi persyaratan sebagai *oil tank* dan tertuang dalam kebijakan Direktur Utama/CEO PT. Pertamina Nomor: 754/F34100/2011-SO. Perubahan muatan yang signifikan dari LCT menjadi SPOB membuat perlu adanya analisa ruang muat kapal setelah dikonversi. Analisa menggunakan metode elemen hingga linear dan nonlinear. Hasil analisa berupa tegangan *von Mises* pada beberapa kondisi pembebanan. Secara khusus penelitian ini bertujuan untuk mengkaji perbedaan antara analisa linear dan analisa nonlinear geometri. Untuk membantu penulis dalam menganalisa, penulis menggunakan alat bantu *software* berbasis metode elemen hingga dengan melakukan pemodelan dengan 5 kondisi pembebanan pada MSC Patran dan MSC Nastran. Tegangan *von Mises* terbesar terjadi pada *Loading Condition IV* dengan kondisi pembebanan *Cargo Oil Tank* dikosongkan dan kondisi sarat 0,9T, yaitu $5,89 \times 10^7$ Pa pada analisa linear statis dan $5,51 \times 10^7$ Pa pada analisa nonlinear statis, *hotspot stress* terletak pada *Longitudinal Bulkhead* yang dekat dengan *fixed support*. Analisa tegangan dengan metode elemen hingga linear statis memiliki nilai tegangan von Mises yang lebih besar dibandingkan nilai tegangan von Mises dengan metode elemen hingga nonlinear statis.

Kata Kunci: Analisis kekuatan, SPOB, linear, nonlinear

1. PENDAHULUAN

Kekuatan kapal adalah hal yang sangat penting untuk dianalisa pada sebuah kapal. Kapal yang dibangun terlalu kuat akan menjadi sangat berat, lamban dan membutuhkan biaya yang lebih besar sedangkan kapal yang dibangun dan dirancang terlalu lemah akan sangat beresiko tinggi mengalami kegagalan struktur karena struktur tidak mampu menahan beban atau load yang bervariasi bila kapal berlayar.

SPOB Salra 115 adalah kapal yang dikonversi dari kapal LCT Berlian Samudra. Konversi *Landing Craft Tank* menjadi *Self Propelled Barge* terjadi dikarenakan kebutuhan kapal pengangkut minyak dari tahun ke tahun semakin meningkat, kondisi ini terjadi di

Kalimantan Timur, di sisi lain jumlah *Landing Craft Tank* (LCT) di Provinsi ini juga banyak. LCT tidak dapat digunakan sebagai sarana pengangkut minyak karena terbentur Kebijakan Pertamina. Berdasarkan Kebijakan Direktur Utama/CEO PT. Pertamina Nomor: 754/F34100/2011-SO tentang Kebijakan Sarana Angkut BBM via Laut atau Air, dinyatakan bahwa kapal LCT tidak dapat dipergunakan sebagai sarana angkut BBM kecuali telah dimodifikasi dan disesuaikan notasinya baik dari bidang klasifikasi maupun statutor. PT. Pertamina sebagai pihak yang ditunjuk pemerintah dalam menyediakan dan mendistribusikan minyak, mengharuskan dalam pendistribusian minyak menggunakan notasi kapal oil tank. Sehingga akhir-akhir ini banyak sekali dilakukan Konversi kapal *Landing Craft Tank*

(LCT) menjadi Kapal *Self-Propelled Oil Barge* (SPOB).

Perubahan yang signifikan terjadi pada tanki dibawah *maindeck*, yang pada awalnya hanya *Void Tank* akan berubah menjadi tanki ruang muat, hal ini yang mengharuskan adanya analisa kekuatan struktur pada konstruksi ruang muat kapal setelah dikonversi. Pada Tugas Akhir ini akan menganalisa kekuatan menggunakan Metode Elemen Hingga Linear dan Metode Elemen Hingga Non-linear. Pemodelan FE *analysis software* yang dipakai adalah MSC PATRAN sebagai *Pre Processor* dan MSC NASTRAN sebagai *Processor*. Dalam input pembebanan pada model yang digunakan adalah beban statis berupa beban air laut dan beban muatan. Analisa akan dilakukan menggunakan analisa nonlinear statis dan nonlinear statis.

Setelah didapatkan hasil perhitungan tegangan dari kedua analisa maka akan dibandingkan hasil analisa mana yang lebih baik dan akan dilakukan pengecekan kekuatan struktur.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Self Propelled Oil Barge*

Self Propelled Oil Barge (SPOB) merupakan *barge* yang khusus direncanakan untuk membawa minyak. Kapal *Self Propelled Oil Barge* (SPOB) ini dirancang dengan beberapa bentuk yang berbeda. Biasanya kapal SPOB yang dirancang dengan bentuk haluan yang lebih mendatar sehingga pada kapal ini mengalami kesulitan dalam bermaneuver dan gaya hambat dari gelombang laut sangat kuat sehingga tidak bisa penempuh kecepatan yang maksimal. Dan ada juga kapal SPOB dirancang dengan bentuk haluan yang lancip. [2]

2.2 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*finite element method*) biasa dipandang sebagai perluasan dari metode perpindahan ke masalah continuum berdimensi dua dan tiga seperti plat, struktur selaput (*shell*) dan benda pejal. Dalam metode ini, kontinum sebenarnya diganti dengan sebuah struktur ideal ekivalen yang terdiri dari elemen-

elemen unik (*discrete element*). Elemen ini disebut elemen berhingga dan dihubungkan bersama-sama di sejumlah titik simpul. [5]

Penyelesaian dari metode elemen hingga umumnya menggunakan metode matriks. Notasi matriks, matriks gaya dinyatakan dalam $\{F\} = \underline{F}$ dan matriks *displacement* dalam $\{d\} = \underline{d}$.

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{1z} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ \vdots \\ \vdots \\ F_{nx} \\ F_{ny} \\ F_{nz} \end{Bmatrix}; \{d\} = \begin{Bmatrix} d_{1x} \\ d_{1y} \\ d_{1z} \\ d_{2x} \\ d_{2y} \\ \vdots \\ \vdots \\ d_{nx} \\ d_{ny} \\ d_{nz} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Matriks kekakuan elemen dinyatakan dalam $[k]$ dan amtriks kekakuan global sistem struktur dinyatakan dalam $[K]$.

$$[k] = k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[K] = K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Persamaan dari kesetimbangan sistem struktur dinyatakan dalam:

$$\underline{F} = \underline{K} \underline{d} \quad (4)$$

Persamaan elemen yang dihasilkan secara umum adalah sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \dots \\ f_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2n} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \dots \\ d_n \end{Bmatrix}$$

$$\text{Atau } \{f\} = [k] \{d\} \quad (5)$$

Dimana:

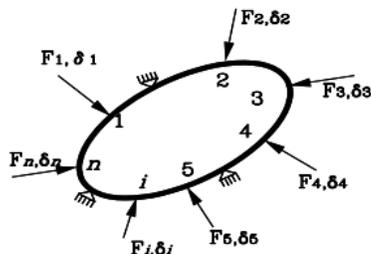
$\{f\}$ = matriks gaya

$[k]$ = matriks kekakuan

$\{d\}$ = matriks deformasi [6]

2.3 Metode Kekakuan (*Stiffness / Displacement Method*)

Metode kekakuan ini adalah prinsip dasar dalam sebuah analisis struktur, salah satunya adalah analisis struktur dengan metode elemen hingga linear. Dalam sebuah analisis struktur, terdapat koefisien-koefisien yang mempengaruhi kekakuan dan defleksi. Kompleksitas geometri struktur, maupun kompleksitas perakitan dari banyak komponen pada sebuah struktur mengakibatkan teknik *differential* menjadi problem yang terlalu kompleks. Oleh karena itu formulasi matematis dalam memecahkan problem struktur dibentuk dalam persamaan aljabar daripada persamaan differensial. Penggunaan koefisien-koefisien ini, khususnya yang menyatakan hubungan antara gaya dan displasemen, sangatlah diperlukan dalam formulasi persamaan aljabar. [14]



Gambar 1. Ilustrasi gaya dan *displacement* pada sebuah objek

Bila dianggap ada sebuah displasemen i , δ_i , pada *node* i , maka besarnya displasemen ini dipengaruhi/disebabkan oleh seperangkat gaya-gaya yang bekerja. Pada struktur linier statis, kontribusi tiap-tiap gaya yang bekerja terhadap displasemen i , δ_i , dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\delta_i = c_{i1}F_1 + c_{i2}F_2 + c_{i3}F_3 + \dots + c_{ii}F_i + \dots + c_{in}F_n \quad (6)$$

2.4 Metode Elemen Hingga Nonlinear

Dalam mekanika struktur, permasalahan linear terjadi ketika matrik kekakuan dihitung berdasarkan geometri dan properties material. Pada kasus *nonlinear* adalah ketika matrik kekakuan bervariasi terhadap kenaikan beban yang bekerja dan dimana vektor beban bergantung pada *displacement*. Kenonlinearan pada mekanika struktur biasanya dibagi menjadi 2 kelas, kenonlinearan geometri dan kenonlinearan material, yang keduanya akan mempengaruhi deformasi struktur. Kenonlinearan geometri dilihat dari perubahan konfigurasi geometri (seperti defleksi

atau *buckling* yang besar) dan kenonlinearan material dilihat dari perubahan properties material (seperti plastisitas).

Analisa elemen hingga biasanya dinyatakan dengan persamaan kekakuan berikut:

$$\{R\} = [K] \{U\} \quad (7)$$

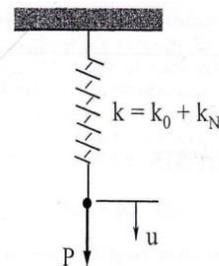
Dimana $\{R\}$ = vector beban, $\{U\}$ = displacement, dan $[K]$ = matriks kekakuan. Baik $[K]$ dan $\{R\}$, keduanya independen dari $\{U\}$ pada analisis linear, sedang $[K]$ dan $\{R\}$ adalah fungsi nonlinear pada $\{U\}$ pada analisis nonlinear. Bagian ini menyajikan beberapa prosedur dasar yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan kekakuan nonlinear.

Seperti yang disampaikan diatas, $\{U\}$ adalah fungsi yang nonlinear yang perlu dihitung. Contohnya adalah pada permasalahan 1 dimensi, dimana pegas nonlinear di bawah beban P , nilai kekakuan dari pegas nonlinear dapat ditulis dengan k yang terdiri dari k_0 dan k_N sebagai pernyataan konstan, dan berikutnya adalah fungsi dari *displacement*. Persamaan kekakuan nonlinear dapat ditulis:

$$P = (k_0 + k_N)u \quad (8)$$

Dimana $k = k_0 + k_N$ = kekakuan pegas nonlinear, k_0 = konstan, $k_N = f(u)$ = nonlinear yang merupakan fungsi dari *displacement*.

Ketika beban P bekerja, yang perlu dihitung adalah *displacement* u . Prosedur iterasi diperlukan untuk menghitung u . Untuk mengetahui beban P dapat digunakan beberapa metode. [8]



Gambar 2. Pegas Nonlinear

2.4.3 The Newton-Raphson Iteration

Metode ini bergantung pada nilai *displacement*, u_A , yang akan mempengaruhi beban P_A . Dalam kasus ini, persamaan kekakuan diberikan oleh persamaan:

$$P_A = \{k_0 + (k_N)_A\} u_A \quad (9)$$

Dimana $(k_N)_A$ menunjukkan k_N yang dievaluasi pada $u = u_A$

Sesudah beban ditingkatkan sampai mencapai nilai P_{n+1} , akan dihitung nilai *displacement* u_B . Pemotongan deret Taylor dari $P = f(u)$ di u_A , diberikan oleh:

$$f(u_A + \Delta u_1) = f(u_A) + \left(\frac{dP}{du}\right)_A \Delta u_1 \quad (10)$$

Dimana $\left(\frac{dP}{du}\right)_A \equiv k_t$ menunjukkan kekakuan *tangent* dengan k_t dievaluasi dari persamaan $\frac{dP}{du} = \frac{d}{du}(k_0 + k_N)u = k_0 + \frac{d}{du}(k_N u) \equiv k_t$ pada $u = u_A$.

Pada iterasi pertama, kenaikan *displacement* Δu_1 , dihitung dari persamaan:

$$\Delta u_1 = (k_t)_0^{-1}(P_B - P_A) \quad (11)$$

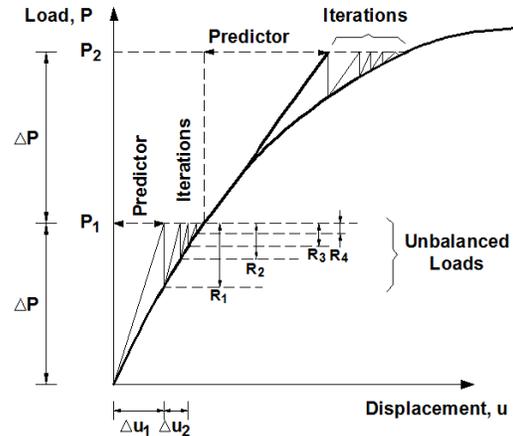
Karena $P_B = f(u_A + \Delta u_1)$ dan $P_A = f(u_A)(k_t)_0$ menunjukkan bahwa k_t dihitung dari persamaan $\frac{dP}{du} = \frac{d}{du}(k_0 + k_N)u = k_0 + \frac{d}{du}(k_N u) \equiv k_t$ pada $u = u_A \cong u_o$. [8]

2.4.4 The Modified Newton-Raphson Iteration

Pada metode ini tidak memerlukan pembaruan matriks tangen kekakuan selama proses iterasi untuk menghilangkan kekuatan yang tidak seimbang, sehingga mencegah pengulangan yang ekstensif. Sebagai hasilnya, upaya penghitungan yang besar akan tersimpan dalam analisis masalah nonlinier dengan jumlah derajat kebebasan yang besar atau tidak diketahui. Namun, jumlah total iterasi harus ditingkatkan untuk mencapai toleransi relatif yang diterima oleh *the original Newton-Raphson method*. [8]

2.5 Analisis Nonlinear Statis pada MSC Nastran

Dalam sebagian besar kasus efek nonlinear dalam struktur terjadi karena perilaku nonlinear material dan nonlinear geometri (deformasi besar). Nonlinier geometri menjadi relevan ketika struktur mengalami perpindahan besar dan rotasi. Efek non-linear geometris yang menonjol dapat dilihat dalam dua aspek: kekakuan geometris karena perpindahan awal dan tekanan, dan kekuatan karena perubahan beban sebagai fungsi *displacement*. Solusi 106 menggunakan proses iterasi berdasarkan metode Newton-Raphson yang dimodifikasi.



Gambar 3. Skematik pada MSC Nastran

Operasi solusi utama adalah beban bertahap atau *time increments*, iterasi menggunakan tes konvergensi untuk mencari *equilibrium error* yang dapat diterima (ditunjukkan oleh R1, R2 ...) dan pembaruan matriks kekakuan. Matriks kekakuan diperbarui sesuai pemilihan metode iteratif (yang memiliki efek pada efisiensi perhitungan). [9]

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Penelitian

3.1.1 Materi Penelitian

Materi penelitian yang dimaksud dalam penelitian ini meliputi data-data yang akan di proses dalam penelitian meliputi data teknis yang diperlukan antara lain:

1. Data ukuran utama kapal.

Lpp	: 36,51 meter
Breadth	: 9,76 meter
Draft	: 1,80 meter
Depth	: 2,38 meter
2. Data gambar-gambar desain konstruksi.

3.1.2 Studi Literatur

Setelah melakukan pengumpulan data serta observasi lapangan, penulis melakukan pengkajian melalui referensi literatur baik dari buku maupun publikasi di internet antara lain tentang:

1. Buku dan jurnal-jurnal tentang Metode Elemen Hingga.
2. Pedoman NASTRAN PATRAN

3.2 Pembuatan Model

Membuat model ruang muat dengan memasukkan data-data dimensi ruang muat sesuai pembagian searah sumbu x, y, z menggunakan program MSC Patran.

3.3 Proses Analisa Model

Model ruang muat kapal tersebut diberi beban dan gaya-gaya menggunakan *software* MSC Patran, kemudian dilakukan analisa menggunakan *software* MSC Nastran.

3.4 Penyajian Data Hasil Perhitungan

Semua hasil pengolahan data berupa gambar model, *display* hasil analisis, serta parameter – parameter yang di perlukan seperti tegangan maksimum dan deformasi dapat diperoleh hasil dari proses tersebut, kemudian dilakukan pengelompokan agar mudah dalam penyusunan laporan.

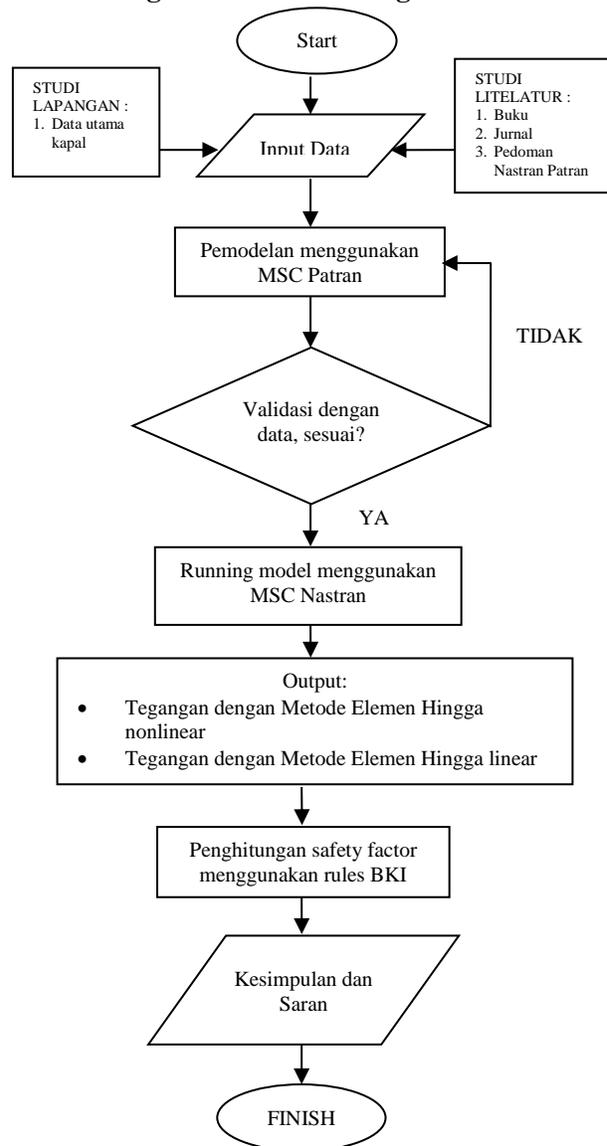
3.5 Analisa dan Pembahasan

Dari semua hasil pengolahan data berupa gambar model, *display* hasil analisis, serta parameter – parameter mekanika teknik yang diperoleh dan telah dikelompokkan maka kemudian dilakukan proses analisa dan pembahasan yang meliputi parameter mekanika yang dicari seperti tegangan maksimum dan deformasi.

3.6 Penarikan Kesimpulan

Dalam tahap ini dilakukan pengambilan kesimpulan dari seluruh tahapan di atas sesuai dengan tujuan awal yang ditetapkan pada penelitian serta saran mengenai pengembangan penelitian lanjutan.

3.7 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 4. Diagram alir metodologi penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Tekanan

Perhitungan besar tekanan eksternal (tekanan hidrostatis air laut) dan tekanan internal (muatan) diperlukan untuk menentukan pembebanan pada permodelan kapal yang telah dibuat.

$$P = \rho g h \quad (12)$$

- **Tekanan Hidrostatis Air**

ρ = massa jenis air laut (1025 kg/m³)

g = percepatan gravitasi (9,8 m/s²)

h = kedalaman permukaan (1,8 m)

$$P = 1025 \times 9,8 \times 1,8$$

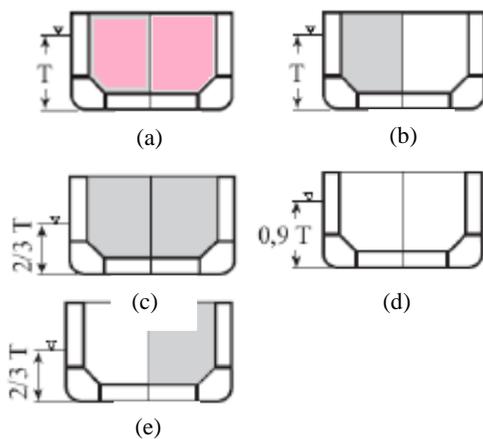
$$= 18081 Pa$$

• **Tekanan Muatan**

ρ = massa jenis *diesel oil* (850 kg/m^3)
 g = percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)
 h = kedalaman permukaan ($2,38 \text{ m}$)
 $P = 850 \times 9,8 \times 1,8$
 $= 19825,4 Pa$

4.2 Kondisi Pembebanan

Kondisi pembebanan yang akan dilakukan berjumlah 5 kondisi, dengan 4 kondisi mengambil dari regulasi BKI 2014 Vol II Sect.24.B.2.2 dan ditambahkan 1 variasi pada kondisi *Full Tank*.



Gambar 5. (a), (b), (c), (d), (e) *Loading Condition I-V*

4.3 Analisa Kekuatan Linear Statis dan Non-linear Statis

Tahap ini dilakukan untuk menghitung nilai stress tertinggi pada setiap variasi pembebanan menggunakan analisa linear statis dan non-linear statis.

1. Proses Pendefinisian Jenis Analisa

Analysis type pada model dapat didefinisikan sesuai yang diinginkan dengan menentukan jenis analisis yang akan dipakai dan sesuai dengan model yang sebenarnya.

2. Penentuan *Material Properties*

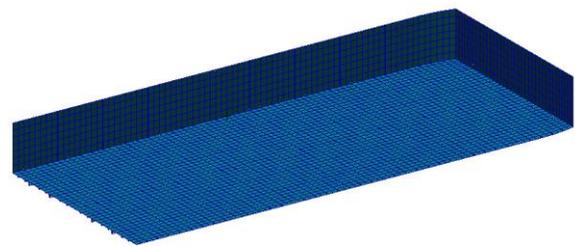
Untuk jenis material yang digunakan dalam model ini adalah baja *grade A*. Dimana kriteria bahan baja tersebut adalah :

Modulus Elastisity = $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Shear Modulus = $0,8 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Poisson's Ratio = 0.30000001
Density = 7.85 ton/m^3

3. Proses *Meshing*

Proses *meshing* adalah proses dimana model dibuat menjadi kumpulan nodal elemen hingga dengan ukuran yang lebih kecil dan saling terhubung.

Karena konstruksi kapal sangat kompleks, *meshing* ditentukan dengan *Size Element edge length* 0,26, dengan parameter semakin kecil *Size* maka *meshing* akan semakin detail, semakin besar *Size* maka *meshing* akan semakin kurang detail.



Gambar 6. Hasil *meshing*

4. Penentuan Kondisi Batas

Boundary Condition digunakan untuk menentukan bentuk tumpuan dari objek yang dianalisa. Penentuan *Boundary Condition* dilakukan sesuai tabel berikut:

Tabel 1. Kondisi batas

Lokasi titik independen	Translasi		
	x	Y	z
Aft	-	Fix	fix
Fore	fix	Fix	fix
Lokasi titik independen	Rotasi		
	x	Y	z
Aft	fix	-	-
Fore	fix	-	-

5. Penentuan *Inertial Loads*

Input Inertial Loads bertujuan untuk memberikan gaya tekan ke bawah sebesar gaya gravitasi bumi.

6. Penentuan *pressure*

Pressure diberikan berdasarkan pada perencanaan asumsi pembebanan dan dimasukkan sesuai dengan perhitungan tekanan.

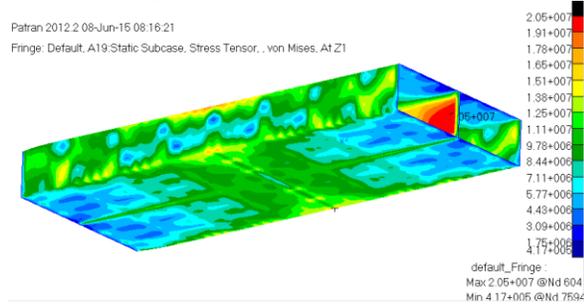
7. Penentuan *Solution Type*

Solution Type ditentukan pada saat sebelum model akan di *running* yang bertujuan untuk memilih jenis analisa. Pada tugas akhir ini penulis menggunakan 2 *solution type*, yaitu *Linear Static* dan *Nonlinear Static*.

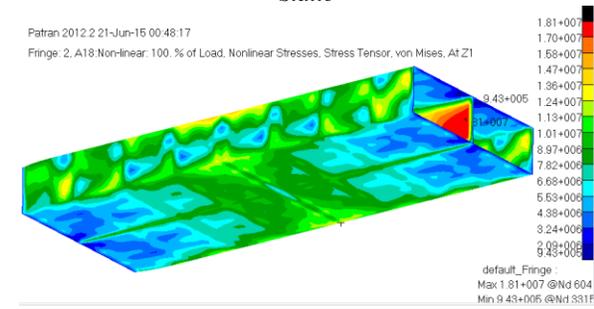
8. General Postprocessing

Dalam tahap *postprocessing* akan dapat diketahui hasil dari *running* perhitungan *software* sesuai dengan masing-masing kejadian variasi pembebanan. Nantinya didapatkan hasil *stress* tertinggi dan lokasi *hotspot stress*.

• Loading Condition I



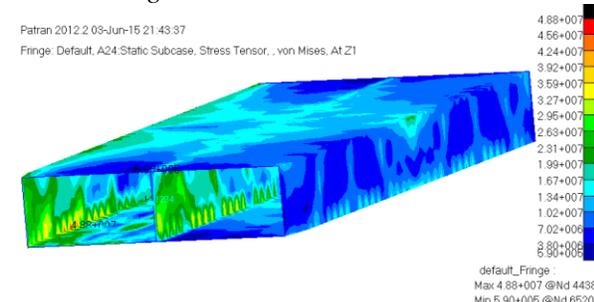
Gambar 7. Hasil *running* tegangan maksimal LC I *Linear Static*



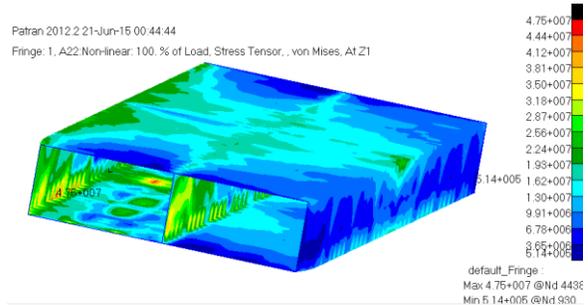
Gambar 8. Hasil *running* tegangan maksimal LC I *Nonlinear Static*

Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $2,05 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,638cm pada analisa linear. Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $1,81 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,548cm pada analisa nonlinear. Tegangan maksimal terjadi pada *Longitudinal Bulkhead*.

• Loading Condition II



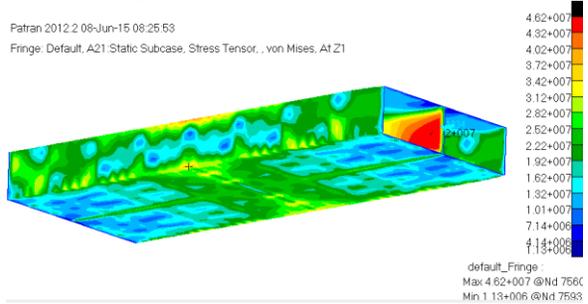
Gambar 9. Hasil *running* tegangan maksimal LC II *Linear Static*



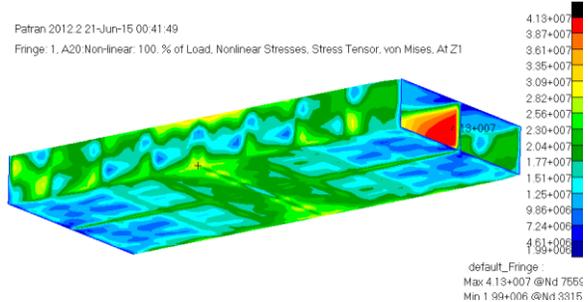
Gambar 10. Hasil *running* tegangan maksimal LC II *Nonlinear Static*

Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $4,88 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 2,86cm pada analisa linear. Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $4,75 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 2,84cm pada analisa nonlinear. Tegangan maksimal terjadi pada pertemuan *mainframe* dengan *deckbeam*.

• Loading Condition III



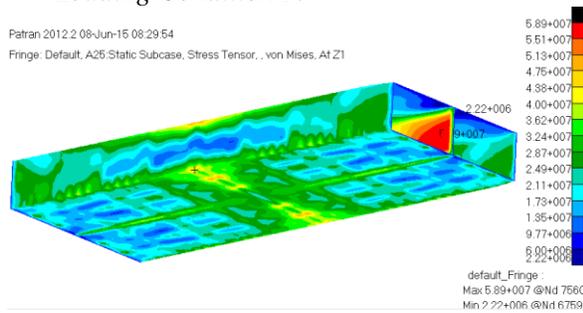
Gambar 11. Hasil *running* tegangan maksimal LC III *Linear Static*



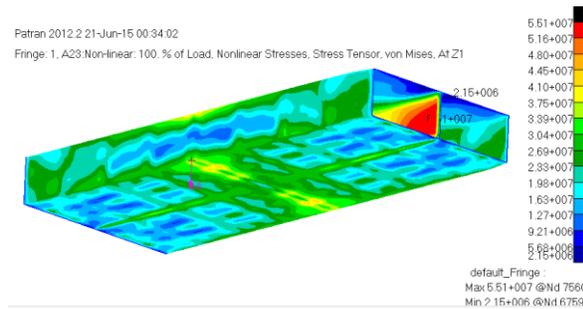
Gambar 12. Hasil *running* tegangan maksimal LC III *Nonlinear Static*

Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $4,62 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 1,64cm pada analisa linear. Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $4,13 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 1,43cm pada analisa nonlinear. Tegangan maksimal terjadi pada *Longitudinal Bulkhead*.

- **Loading Condition IV**



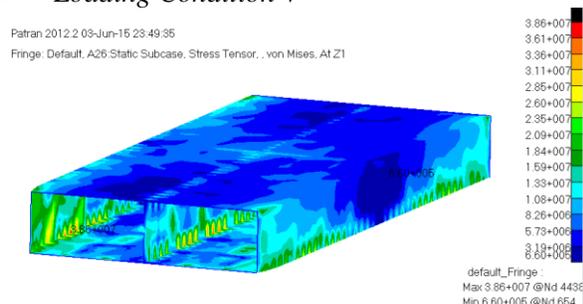
Gambar 13. Hasil *running* tegangan maksimal LC IV *Linear Static*



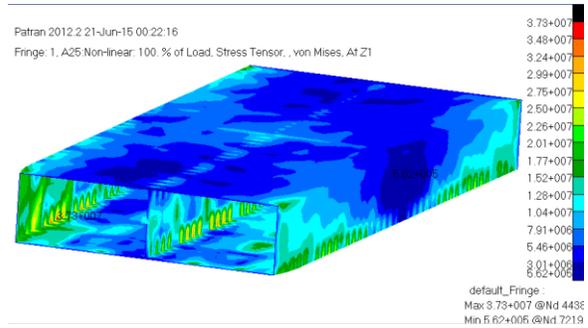
Gambar 14. Hasil *running* tegangan maksimal LC IV *Nonlinear Static*

Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $5,89 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 2,47cm pada analisa linear. Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $5,51 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 2,36cm pada analisa nonlinear. Tegangan maksimal terjadi pada *Longitudinal Bulkhead*.

- **Loading Condition V**



Gambar 15. Hasil *running* tegangan maksimal LC V *Linear Static*



Gambar 16. Hasil *running* tegangan maksimal LC V *Nonlinear Static*

Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $3,86 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 1,87cm pada analisa linear. Tegangan maksimal yang terjadi sebesar $3,73 \times 10^7$ Pa dan nilai deformasi maksimal sebesar 1,77cm pada analisa nonlinear. Tegangan maksimal terjadi pada pertemuan *mainframe* dengan *deckbeam*.

4.4 Perbandingan Hasil Analisa Linear Statis dengan Analisa Nonlinear Statis

Setelah dilakukan analisa linear statis dan nonlinear statis pada 5 kondisi pembebanan, didapatkan hasil sebagai berikut.

Tabel 2. Rekap Hasil Analisa

LC	Linear statis		Nonlinear statis	
	Tegangan Max. (Pa)	Deformasi (cm)	Tegangan Max. (Pa)	Deformasi (cm)
LC I	$2,05 \times 10^7$	0,683	$1,81 \times 10^7$	0,548
LC II	$4,88 \times 10^7$	2,86	$4,75 \times 10^7$	2,84
LC III	$4,62 \times 10^7$	1,64	$4,13 \times 10^7$	1,43
LC IV	$5,89 \times 10^7$	2,47	$5,51 \times 10^7$	2,36
LC V	$3,86 \times 10^7$	1,87	$3,73 \times 10^7$	1,77

Analisa tegangan dengan metode elemen hingga linear statis selalu memiliki nilai tegangan von Mises yang lebih besar dibandingkan nilai tegangan von Mises dengan metode elemen hingga nonlinear statis. Pada LC I menggunakan analisa linear, tegangan maksimal melewati tegangan ijin pada kenaikan beban 2,2 kali beban awal, sedangkan pada analisa nonlinear, tegangan maksimal melewati tegangan ijin pada kenaikan beban 2,6 kali beban awal.

Pada kasus *small displacement*, analisa linear masih dapat digunakan dan diterima, tetapi pada kasus *large displacement*, analisa nonlinear akan lebih baik digunakan dibandingkan analisa linear. Semakin besar *displacement* maka semakin baik analisa nonlinear digunakan dibandingkan dengan analisa linear. Perbedaan hasil analisa antara metode elemen hingga linear statis dan metode

elemen hingga nonlinear statis yang paling mendasar terdapat pada persamaan berikut

$$[R] = [K] \{U\} \quad (13)$$

Baik $[K]$ dan $[R]$, keduanya independen dari $\{U\}$ pada analisis linear, sedang $[K]$ dan $[R]$ adalah fungsi nonlinear pada $\{U\}$ pada analisis nonlinear.

4.5 Safety Factor (Faktor Keamanan)

Sebelum menghitung *safety factor*, dicari terlebih dahulu nilai tegangan ijin sesuai dengan ketentuan BKI 2014 Vol II sec 9 B 3.1.

$$\sigma_{Pr} = \sigma_{perm} + \sigma_{LB} - 2[(\sigma_{LB} + \sigma_{LD})/H] \quad (17)$$

$$\sigma_{Pr} = 183,60 \text{ N/mm}^2$$

Tabel 3. Perhitungan *Safety Factor* menurut tegangan ijin BKI

LC	Node	Tegangan max. (N/mm ²)	Tegangan ijin (N/mm ²)	SF	Ket.	
LC I	Linear	596	20,5	186,6	8,96	Pass
	Nonlinear	604	18,1	186,6	10,14	Pass
LC II	Linear	4438	48,8	186,6	3,76	Pass
	Nonlinear	4438	47,5	186,6	3,86	Pass
LC III	Linear	7560	46,2	186,6	3,97	Pass
	Nonlinear	7559	41,3	186,6	4,44	Pass
LC IV	Linear	7560	58,9	186,6	3,12	Pass
	Nonlinear	7560	55,1	186,6	3,33	Pass
LC V	Linear	4438	38,6	186,6	4,75	Pass
	Nonlinear	4438	37,3	186,6	4,92	Pass

Tabel 4. Perhitungan *Safety Factor* menurut kriteria bahan BKI

LC	Node	Tegangan max. (N/mm ²)	Kriteria bahan (N/mm ²)	SF	Ket.	
LC I	Linear	596	20,5	400	19,51	Pass
	Nonlinear	604	18,1	400	22,1	Pass
LC II	Linear	4438	48,8	400	8,2	Pass
	Nonlinear	4438	47,5	400	8,42	Pass
LC III	Linear	7560	46,2	400	8,66	Pass
	Nonlinear	7559	41,3	400	9,68	Pass
LC IV	Linear	7560	58,9	400	6,79	Pass
	Nonlinear	7560	55,1	400	7,26	Pass
LC V	Linear	4438	38,6	400	10,36	Pass
	Nonlinear	4438	37,3	400	10,72	Pass

5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Tegangan von Mises terbesar terjadi pada *Loading Condition* IV dengan kondisi pembebanan *Cargo Oil Tank* dikosongkan dan kondisi sarat 0,9T, yaitu $5,89 \times 10^7$ Pa (*node @7560*) pada analisa linear statis dan $5,51 \times 10^7$ Pa (*node @7560*) pada analisa nonlinear statis. Tegangan maksimal tersebut masih berada dibawah σ_{ijin} sebesar 183,60

N/mm², oleh karna itu dapat dikatakan struktur konstruksi ruang muat kapal SPOB Salra 115 berada pada kondisi aman. Nilai aman tersebut terletak pada titik kritis saat sistem bekerja sehingga batas aman mewakili seluruh struktur konstruksi lambung kapal saat bekerja dalam analisa kriteria kegagalan struktur.

2. Analisa tegangan dengan metode elemen hingga linear statis selalu memiliki nilai tegangan von Mises yang lebih besar dibandingkan nilai tegangan von Mises dengan metode elemen hingga nonlinear statis. Demikian juga untuk nilai deformasi pada setiap kondisi, nilai deformasi dengan metode elemen hingga linear statis selalu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan nilai deformasi dengan metode elemen hingga nonlinear statis. Sebagai contoh pada LC I, tegangan maksimal pada analisis linear adalah $2,05 \times 10^7$ Pa dan mengalami deformasi maksimal 0,638 cm, tegangan maksimal pada analisis nonlinear adalah $1,81 \times 10^7$ Pa dan mengalami deformasi maksimal 0,548 cm. Dilihat dari hasil deformasi, penelitian kali ini masuk pada kasus *small displacement*, jadi hasil tegangan dengan metode elemen hingga linear statis masih dapat diterima, tetapi akan lebih akurat jika menggunakan metode elemen hingga nonlinear statis.

5.2 Saran

1. Pemodelan dengan menggunakan metode Elemen hingga sangat bergantung kepada jumlah elemen yang dipergunakan dan kesesuaian pemberian *constraint* dan *load* sesuai tempatnya pada suatu model. Sehingga untuk mendapatkan hasil pemodelan yang lebih baik hendaknya pembuatan model dilakukan dengan pembagian *mesh* yang lebih banyak lagi, terutama pada daerah yang menjadi mengalami pemusatan tegangan. Dengan demikian hasil yang akan didapat mendekati kondisi sesungguhnya.
2. Perlu dilakukan optimasi kondisi pembebanan untuk mendapatkan pembebanan maksimum yang memungkinkan dari struktur konstruksi lambung kapal SPOB Salra 115.

3. Perlu dilakukan kajian *fatigue* dari struktur konstruksi lambung kapal SPOB Salra 115.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Adnyani, Luh Putri. 2014. *Analisa Kekuatan Ultimate Hull Girder FPSO Dengan Pendekatan Metode Elemen Hingga Nonlinear*, Tesis, Jurusan Teknik Kelautan, ITS: Surabaya
- [2] Ajmain. 2010. *Studi Pengkajian Sistem Kelistrikan Akibat Perubahan Deck Pada Kapal Self Propelled Oil Barge (Spob) Seroja I*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan, ITS: Surabaya
- [3] Biro Klasifikasi Indonesia, PT. Persero. 2014. *Rules for Classification and Construction of Sea Going Steel Ship Volume II : Rules for Hull Edition 2014*, Jakarta : Biro Klasifikasi Indonesia
- [4] Fatahillah, Zainul Arifin. 2013. *Analisa Teknis dan Ekonomis Konversi Landing Craft Tank Menjadi Self Propelled Oil Barge*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Perkapalan, ITS: Surabaya
- [5] Ghali, A., Neville, A.M. 1985. *Analisa Struktur Edisi Kedua*, Jakarta: Penerbit Erlangga
- [6] Handyanu. 2012. *Metode Elemen Hingga*, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [7] Heru Suryanto, *Aplikasi Metode Elemen Hingga Untuk Analisa Struktur Statik Linier Dengan Program MSC NASTRAN* [online]. Diakses tanggal: 2 November 2014. Available: <https://www.academia.edu/812231/APLIKASI METODE ELEMEN HINGGA UNTUK ANALISA STRUKTUR STATIK LINIER DENGAN PROGRAM MSC NASTRAN>
- [8] Hughes, Owen F., Paik, Jeom Kee. 2010. *Ship Structural Analysis and Design*, New Jersey: The Society of Naval Architect and Marine Engineering
- [9] Michele Raiano, *Non Linear Analysis SOL 106* [online]. Diakses tanggal: 11 Juni 2015. Available: <http://aerospaceengineering.net/?p=1378>
- [10] Popov, E.P. 1978. *Mechanics of Materials*, 2nd edition, New Jersey: Prentice-Hall
- [11] The MSC Software Corporation. 2014. *Nonlinear User's Guide*, Newport Beach: The MSC Software Corporation
- [12] The MSC Software Corporation. 1999. *Practical Finite Element Modeling Techniques using MSC. NASTRAN*, Colorado: The MacNeal-Schwendler Corporation
- [13] Yunanto, Wahyu Dwi. 2014. *Analisa Kontruksi Car Deck Kapal Ropax 5000gt Dengan Metode Elemen Hingga*, Tugas Akhir, Program Studi S1 Teknik Perkapalan, Undip: Semarang
- [14] Zaki, Ahmad Fauzan. 2014. *Buku Ajar Metode Elemen Hingga*, Semarang: Universitas Diponegoro