

Studi Pengaruh Perambatan Retak pada Struktur Pondasi Tangki SPB

Kadek Mahardhika Dwi Arsana, Achmad Zubaydi, dan Septia Hardy Sujiantanti
Departemen Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: zubaydi@na.its.ac.id

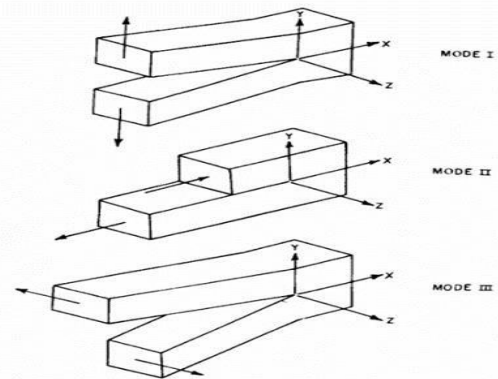
Abstrak—LNG diekspor menggunakan kapal berjenis gas carrier. Dalam beberapa tahun terakhir, pembangunan kapal LNG menjadi meningkat dikarenakan peningkatan kebutuhan pasar LNG. Kapal LNG memiliki tangki khusus yang dirancang untuk dapat menampung LNG pada suhu yang sangat rendah. IGC Code, tipe tangki muatan kapal LNG dapat diklasifikasikan menjadi membrane tank dan independent tank. Tangki independen terdiri dari independent spherical type-B, independent prismatic type-B, dan cylindrical type-C. Penelitian ini terfokus pada tangki tipe prismatic type-B atau yang lebih dikenal sebagai tangki IHI-SPB. Tangki SPB memiliki pondasi pada bagian bawah tangki yang berfungsi untuk menopang tangki LNG. Pada kondisi kapal beroperasi, pondasi tangki harus mampu menahan beban tangki dan beban muatan yang bersifat statis dan dinamis. Proses pengisian dan bongkar muat LNG menyebabkan perubahan beban yang dialami oleh pondasi. Hal ini menyebabkan pondasi mengalami perubahan tegangan yang berulang-ulang dan dapat menyebabkan terjadinya retak awal, yang kemudian akan terus merambat selama pondasi mengalami pembebanan yang berulang. Analisis pengaruh perambatan retak dilakukan dengan metode mekanika kepecahan pada pondasi tangki untuk mengetahui nilai stress intensity factor (SIF) dan laju perambatan retak hingga mencapai panjang retak kritis. Ketebalan pondasi tangki sebesar 15 mm dan panjang initial crack 10 mm dengan variasi pengisian LNG 75% dan 50% yang akan dianalisis pada penelitian ini. Dari hasil analisis, untuk pengisian LNG 75% didapatkan nilai SIF sebesar $8,17 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pada retak awal dan $46,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pada panjang kritis dengan nilai laju perambatan retak menuju panjang kritis sebesar $2,21 \times 10^{-5} \text{ in/cycle}$. Untuk pengisian LNG 50% didapatkan nilai SIF sebesar $5,97 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pada retak awal dan $44,77 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ pada panjang kritis dengan laju perambatan retak menuju panjang kritis sebesar $1,88 \times 10^{-5} \text{ in/cycle}$.

Kata Kunci—Pondasi Tangki, Perambatan Retak, Stress Intensity Factor.

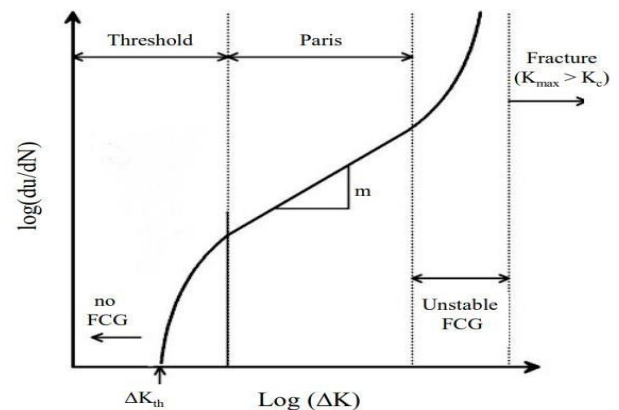
I. PENDAHULUAN

GAS alam yang terurai atau LNG, adalah gas alam yang telah diproses untuk menghilangkan pengotor atau impuritas dan hidrokarbon fraksi berat. Kemudian pada tekanan atmosfer LNG didinginkan hingga menjadi cairan pada suhu sekitar -163°C . Negara Indonesia berada di antara lima besar negara eksportir gas alam cair (LNG) di dunia pada tahun 2019. Lima konsumen teratas Indonesia berdasarkan pangsa adalah Amerika Serikat, Jepang, Taiwan, Korea, dan Cina. Namun, pada 2021 terjadi penurunan menjadi peringkat ke-8 di dunia dengan volume ekspor sebesar 14,6 miliar m³.

LNG diekspor dengan menggunakan kapal berjenis gas carrier. Dalam beberapa tahun terakhir, pembangunan kapal LNG menjadi meningkat dikarenakan peningkatan kebutuhan pasar LNG. Kapal LNG memiliki tangki khusus yang dirancang untuk dapat menampung LNG pada suhu yang sangat rendah. Tangki pada kapal LNG dibagi menjadi



Gambar 1. Tiga mode retak.

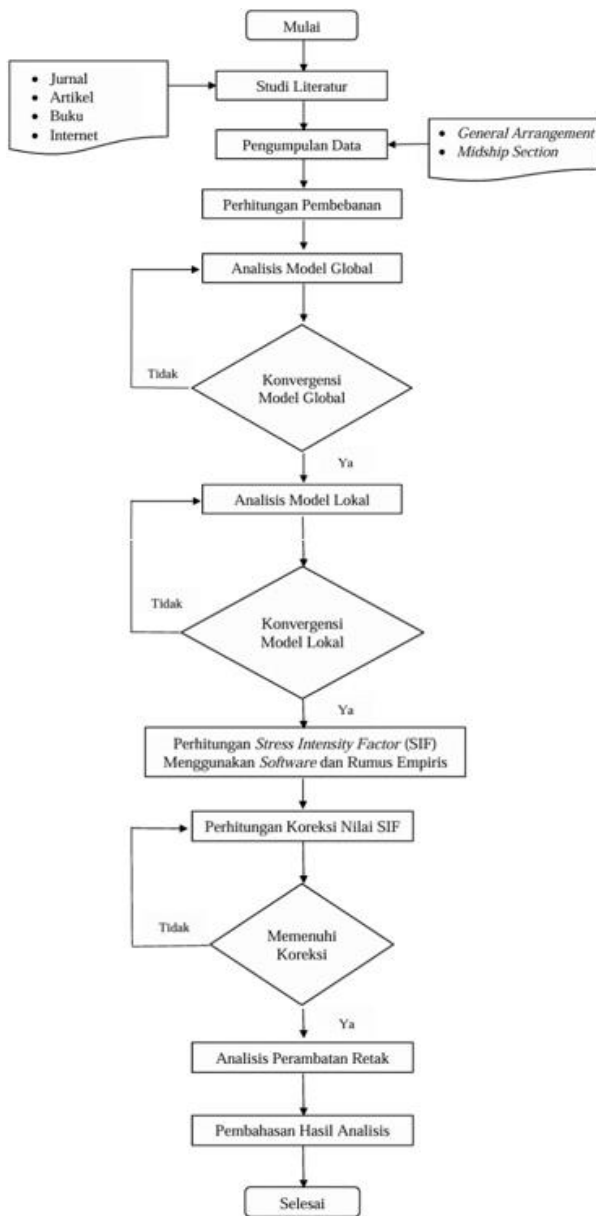


Gambar 2. Region perambatan retak.

dua, yaitu tangki independen dan non-independen/membran. Konstruksi tangki independen tidak menyatu dengan struktur kapal, sedangkan konstruksi tangki membran menyatu dengan struktur kapal.

Penelitian ini menggunakan salah satu dari tiga jenis tangki independen yaitu tangki SPB. Tangki SPB memiliki pondasi yang berfungsi untuk menopang tangki. Selama kapal beroperasi, pondasi tangki harus mampu menahan beban tangki dan beban muatan yang bersifat statis dan dinamis. Proses pengisian dan bongkar muat LNG menyebabkan perubahan beban yang dialami oleh pondasi. Hal ini menyebabkan pondasi mengalami perubahan tegangan yang berulang-ulang dan dapat menyebabkan terjadinya retak awal, yang kemudian akan terus merambat selama pondasi mengalami pembebanan yang berulang.

Penelitian mengenai perambatan retak menggunakan metode elemen hingga. Pengkajian dilakukan pada pondasi tangki kapal LNG dengan tipe tangki Self-Supporting Prismatic Type-B (SPB) dengan mencari tegangan pada model global untuk mendapatkan model lokal. Analisis dilakukan dengan variasi rasio pengisian LNG 75% dan 50% pada pondasi tangki dengan ketebalan 15 mm dan menggunakan retak mode I. Hasil yang diharapkan dari



Gambar 3. Diagram alir pengerjaan.

penelitian ini berupa nilai stress intensity factor dan laju perambatan retak pada pondasi tangki.

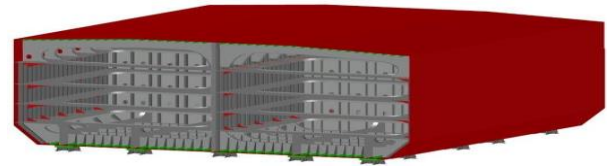
II. STUDI LITERATUR

A. LNG (*Liquefied Natural Gas*)

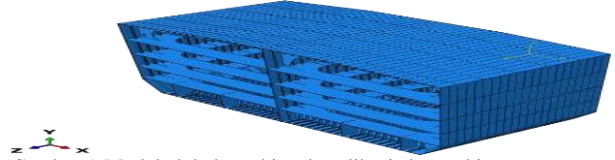
LNG merupakan singkatan dari *Liquefied Natural Gas*, atau gas alam cair dalam Bahasa Indonesia. LNG merupakan gas alam yang telah diproses untuk menghilangkan ketidakmurnian dan hidrokarbon berat dan kemudian dikondensasi menjadi cairan pada tekanan atmosfer dengan mendinginkannya sekitar -160° Celsius [1]. Proses pembuatan LNG terdiri dari beberapa tahap yaitu pembersihan, pendinginan, dan pencairan. Setelah proses pencairan, LNG dapat disimpan pada tangki LNG untuk diekspor atau digunakan sebagai sumber energi.

B. Kapal LNG

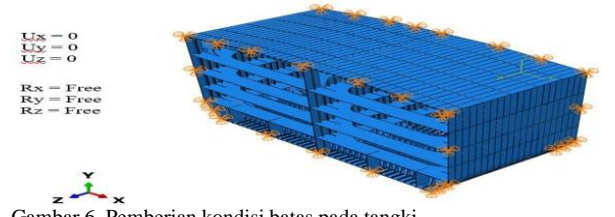
Kapal LNG (*Liquefied Natural Gas*) merupakan kapal yang dirancang khusus untuk mengangkut gas alam cair (LNG). Kapal LNG memiliki tangki khusus untuk



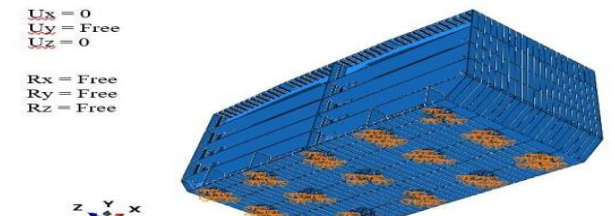
Gambar 4. Model global tangki pada AutoCAD.



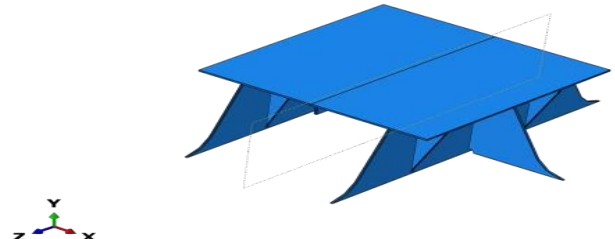
Gambar 5. Model global tangki pada aplikasi elemen hingga.



Gambar 6. Pemberian kondisi batas pada tangki.



Gambar 7. Pemberian kondisi batas pada pondasi.



Gambar 8. Model pondasi tangki di aplikasi elemen hingga.

menampung LNG pada suhu sangat rendah, sekitar -163 derajat Celsius. Muatan yang bersifat kriogenik, apabila mengenai material baja, maka material baja akan menjadi rapuh, retak, atau pecah.

Oleh karena itu, material tangki LNG selalu dibuat dari bahan logam khusus yaitu aluminium, baja tahan karat, 9% nickel steel, dan bronze. Kapal ini memiliki isolasi yang terbuat dari bahan foam atau bahan isolasi lainnya yang berguna untuk menjaga suhu muatan dan kemungkinan kebocoran. Seluruh konstruksi kapal LNG menggunakan mild steel bukan high tensile steel [2].

C. Tangki SPB

Tangki tipe Independent Prismatic Type-B dikembangkan oleh Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI) dan lebih dikenal dengan sebutan IHI SPB. Desain tangki SPB merupakan perbaikan atas desain dari Conch Independent Tank (Self-supporting Tank Type-A), terutama pada konstruksi dan struktur pendukung beserta sistem isolasinya. Tangki SPB dapat terbuat dari bahan aluminium alloy ASTM 5083-O, stainless steel AISI 304L, dan 9% nickel steel. Material ini dapat menahan karakteristik temperatur muatan

Tabel 1.
Hasil Konvergensi Model Global

Ukuran Mesh (mm)	Jumlah Elemen	Equivalent Stress (MPa)	Error (%)
750	38729	150,5	
600	45001	150,3	-0,1%
450	57351	142,8	-5%
300	92933	151,6	6,2%

Tabel 2.
Hasil Konvergensi Model Lokal

Ukuran Mesh (mm)	Jumlah Elemen	Equivalent Stress (MPa)	Error (%)
120	2281	263	
110	2404	277	5.0
100	2710	261	-6.1
95	2945	254	-2.7
85	3128	244	-4.0
75	3819	248	1.6
65	4619	248	0

Tabel 3.
Hasil Nilai SIF pada Pengisian LNG 75%

a ₀ (m)	a _r (m)	KI (MPa√m)	KI (Ksi√in)	KIC (MPa√m)
0,01	0,02	8,17	7,44	44,7
0,02	0,03	11,75	10,69	44,7
0,03	0,04	15,05	13,70	44,7
0,04	0,05	16,84	15,33	44,7
0,05	0,06	19,23	17,50	44,7
0,06	0,07	22,60	20,57	44,7
0,07	0,08	23,59	21,47	44,7
0,08	0,09	25,56	23,26	44,7
0,09	0,10	26,55	24,16	44,7
0,10	0,11	28,36	25,81	44,7
0,11	0,12	29,26	26,63	44,7
0,12	0,13	30,97	28,18	44,7
0,13	0,14	32,60	29,67	44,7
0,14	0,15	33,01	30,04	44,7
0,15	0,16	34,53	31,42	44,7
0,16	0,17	36,27	33,01	44,7
0,17	0,18	37,93	34,52	44,7
0,18	0,19	39,12	35,60	44,7
0,19	0,20	41,33	37,61	44,7
0,20	0,21	42,89	39,03	44,7
0,21	0,22	44,13	40,16	44,7
0,22		46,60	42,41	44,7

yang sangat rendah. Tangki SPB dipisahkan menjadi 4 bagian oleh tight centerline bulkhead (memanjang) dan swash bulkhead (melintang). Konstruksi ini membuat frekuensi alami cairan di dalam tangki jauh dari frekuensi gerak kapal, sehingga kecil kemungkinan terjadinya resonansi antara cairan kargo dan dua gerakan kapal (rolling dan pitching). Oleh karena itu, tidak ada masalah sloshing dan tangki dapat diisi dengan level muatan apapun.

D. Tegangan

Tegangan merupakan rasio antara gaya yang bekerja pada suatu benda dan luas penampang benda tersebut. Satuan tegangan adalah gaya dalam newton dibagi dengan satuan luas penampang dalam m² atau mm². Tegangan mengakibatkan terjadinya regangan pada suatu benda yang diberi gaya sehingga dapat memengaruhi besarnya luasan yang diberikan beban. Untuk penelitian ini, parameter yang digunakan adalah tegangan von mises dan tegangan normal.

Tabel 4.
Hasil nilai SIF pada Pengisian 50%

a ₀ (m)	a _r (m)	KI (MPa√m)	KI (Ksi√in)	KIC (MPa√m)
0,01	0,02	5,97	5,43	44,7
0,02	0,03	8,72	7,93	44,7
0,03	0,04	11,33	10,31	44,7
0,04	0,05	12,62	11,48	44,7
0,05	0,06	14,36	13,07	44,7
0,06	0,07	16,89	15,37	44,7
0,07	0,08	17,63	16,04	44,7
0,08	0,09	19,10	17,38	44,7
0,09	0,10	19,83	18,05	44,7
0,10	0,11	21,19	19,28	44,7
0,11	0,12	21,87	19,90	44,7
0,12	0,13	23,10	21,02	44,7
0,13	0,14	24,30	22,11	44,7
0,14	0,15	24,58	22,37	44,7
0,15	0,16	25,76	23,44	44,7
0,16	0,17	27,03	24,60	44,7
0,17	0,18	28,30	25,75	44,7
0,18	0,19	29,37	26,73	44,7
0,19	0,20	30,93	28,15	44,7
0,20	0,21	32,04	29,16	44,7
0,21	0,22	32,97	30,00	44,7
0,22	0,23	34,67	31,55	44,7
0,23	0,24	37,11	33,77	44,7
0,24	0,25	38,05	34,63	44,7
0,25	0,26	39,95	36,36	44,7
0,26	0,27	40,39	36,76	44,7
0,27	0,28	42,00	38,22	44,7
0,28		44,77	40,74	44,7

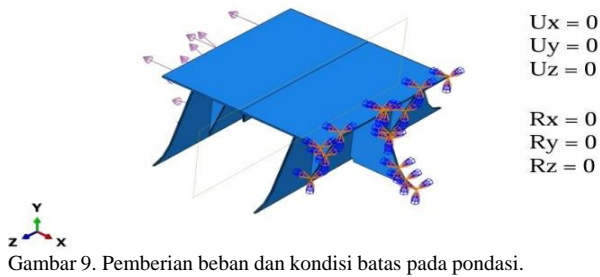
Tabel 5.
Nilai da/dN pada Pengisian 75% dan 50%

a ₀ (in)	a _r (in)	da/dN 50% (in/cycle)	da/dN 75% (in/cycle)
0,39	0,79	5,38E-08	1,41E-07
0,79	1,18	1,69E-07	4,21E-07
1,18	1,57	3,68E-07	8,78E-07
1,57	1,97	5,09E-07	1,23E-06
1,97	2,36	7,49E-07	1,83E-06
2,36	2,76	1,22E-06	2,97E-06
2,76	3,15	1,39E-06	3,38E-06
3,15	3,54	1,76E-06	4,30E-06
3,54	3,94	1,97E-06	4,82E-06
3,94	4,33	2,41E-06	5,88E-06
4,33	4,72	2,65E-06	6,46E-06
4,72	5,12	3,12E-06	7,65E-06
5,12	5,51	3,63E-06	8,93E-06
5,51	5,91	3,76E-06	9,27E-06
5,91	6,30	4,33E-06	1,06E-05
6,30	6,69	5,00E-06	1,23E-05
6,69	7,09	5,74E-06	1,41E-05
7,09	7,48	6,41E-06	1,54E-05
7,48	7,87	7,49E-06	1,82E-05
7,87	8,27	8,32E-06	2,03E-05
8,27	8,66	9,07E-06	2,21E-05
8,66	9,06	1,06E-05	
9,06	9,45	1,29E-05	
9,45	9,84	1,39E-05	
9,84	10,24	1,61E-05	
10,24	10,63	1,67E-05	
10,63	11,02	1,88E-05	

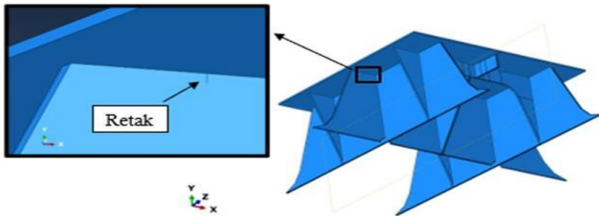
Tegangan von mises adalah tegangan yang dihitung antara tegangan utama dan tegangan geser sehingga nilainya lebih komprehensif dibandingkan dengan tegangan lainnya [3].

Tegangan dapat dibagi menjadi dua, yaitu *engineering stress* dan *true stress*. Tegangan teknik sendiri merupakan nilai tegangan yang dihitung dengan asumsi luas penampang awal dan akhir adalah sama.

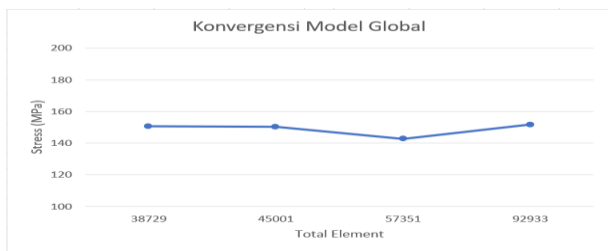
$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$



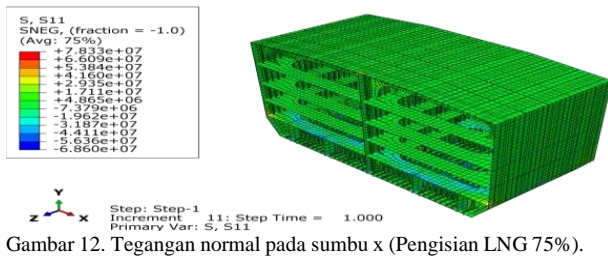
Gambar 9. Pemberian beban dan kondisi batas pada pondasi.



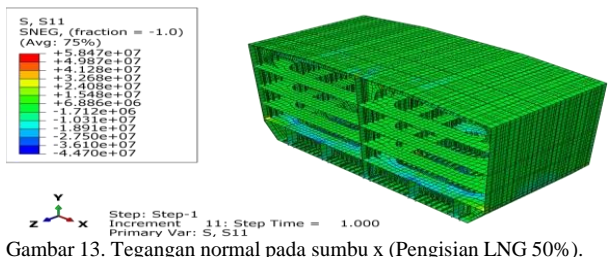
Gambar 10. Lokasi retak pada pondasi tangki.



Gambar 11. Grafik konvergensi model global.



Gambar 12. Tegangan normal pada sumbu x (Pengisian LNG 75%).



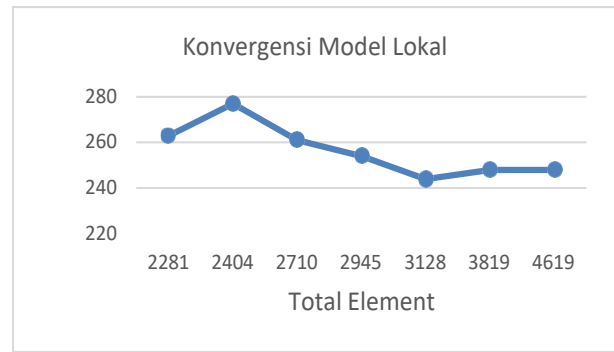
Gambar 13. Tegangan normal pada sumbu x (Pengisian LNG 50%).

dimana:

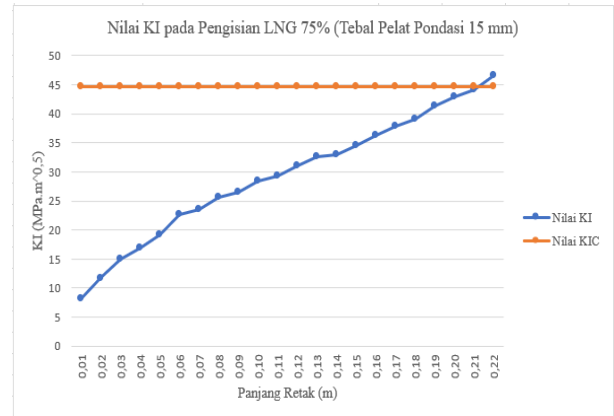
- σ_{vm} = Tegangan von mises (MPa)
- σ_x = Tegangan normal sumbu x (MPa)
- σ_y = Tegangan normal sumbu y (MPa)
- τ_{xy} = Tegangan geser elemen (MPa)

E. Mekanika Kepecahan

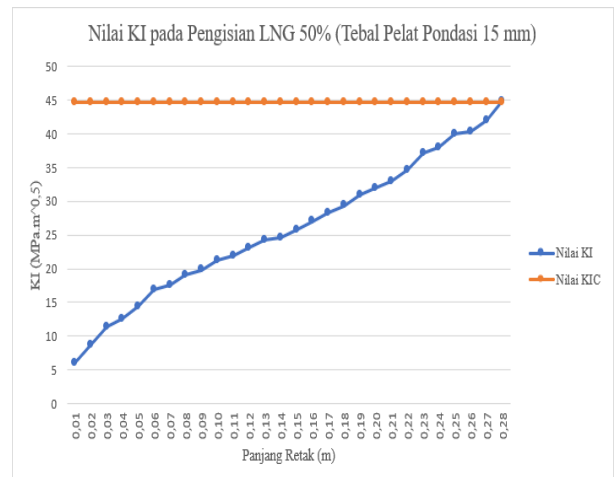
Mekanika kepecahan atau ilmu kepecahan, merupakan cabang dari mekanika yang mempelajari analisis tegangan dan regangan pada struktur yang mengandung retak. Pendekatan ini diciptakan sebagai tanggapan terhadap kelemahan konsep desain konvensional yang hanya bergantung pada sifat-sifat umum material seperti kekuatan tarik, batas elastis, dan tegangan *buckling*. Retak dan kerusakan kemungkinan besar terjadi pada sambungan las, diskontinuitas struktural, dan area konsentrasi tegangan [4].



Gambar 14. Grafik konvergensi model lokal.



Gambar 15. Grafik KI pada pengisian LNG 75%.



Gambar 16. Grafik KI pada pengisian LNG 50%.

Struktur yang tidak memiliki cacat adalah yang paling cocok untuk menerapkan konsep ini. Teori kepecahan dibagi menjadi dua cabang utama: *Linear Fracture Mechanics* (LEFM) dan *Elastic-Plastic Fracture Mechanics* (EPFM).

F. Linear Elastic Fracture Mechanic (LEFM)

LEFM didasarkan pada prosedur analitis yang menghubungkan besarnya daerah tegangan dan distribusi tegangan elastis di sekitar ujung retak dengan tegangan nominal yang dikenakan pada daerah diskontinuitas, serta bentuk retak dan sifat-sifat material itu sendiri [5]. LEFM digunakan pada daerah plastis yang sangat kecil dimana tegangan lebih rendah dibandingkan dengan tegangan kerja material ($\sigma < \sigma_{ys}$). Pada umumnya LEFM diterapkan pada material yang bersifat *brittle* seperti keramik, kaca, atau baja berkekuatan tinggi, sehingga zona plastisnya sangat terbatas dikarenakan tegangan berada di bawah batas kerja material.

Retak dibagi menjadi tiga mode yaitu mode 1 (*opening*), mode 2 (*sliding*), dan mode 3 (*tearing*) seperti pada Gambar 1.

G. Stress Intensity Factor

Faktor intensitas tegangan merupakan salah satu parameter yang paling mendasar pada mekanika retak. SIF *number* menggambarkan keadaan tegangan di ujung retak dan terkait dengan laju pertumbuhan retak serta digunakan untuk menetapkan kriteria kegagalan akibat retak.

$$K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a f(g)}$$

dimana:

K = Faktor intensitas tegangan (MPa.mm^{0,5})

σ_{nom} = Tegangan nominal (MPa)

a = Panjang retak (mm)

$f(g)$ = Faktor geometri

H. Crack Propagation

Perambatan retak yang disebabkan oleh kelelahan pada logam dibedakan menjadi tiga daerah. Region I menunjukkan *fatigue treshold cyclic stress intensity factor fluctuation*, ΔK_{TH} , dimana pada daerah ini laju perambatan retak sangat kecil meskipun struktur dikenai beban siklis yang berfluktuasi. Region II menunjukkan perambatan retak terjadi dikarenakan kelelahan di atas ΔK_{TH} , sedangkan region III, terjadi perambatan retak yang lebih tinggi dibandingkan region II. Grafik region perambatan retak dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada region II, garis untuk nilai ΔK berupa linear. Region ini menunjukkan perambatan retak yang terjadi, untuk nilai laju perambatan retak pada region II dapat dihitung dengan menggunakan rumus Paris Erdogan sebagai berikut:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Pada umumnya, model Paris yang ditunjukkan pada persamaan digunakan untuk mengevaluasi perilaku pertumbuhan retak yang dinyatakan dengan menggunakan hubungan antara faktor intensitas tegangan dan laju pertumbuhan retak (da/dN) seperti ditunjukkan pada Gambar 2, dimana a adalah ukuran retak, N adalah jumlah *cycle*, C dan m adalah konstanta material [6].

I. Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau dalam bahasa Inggris dikenal sebagai *Finite Element Analysis*, merupakan metode numerik yang digunakan untuk memecahkan persamaan diferensial parsial dalam dua atau tiga variabel ruang. Prinsip dari metode elemen hingga yaitu membagi objek benda menjadi beberapa substruktur berhingga yang disebut dengan *meshing*. Beberapa substruktur tersebut disebut dengan elemen. Elemen-elemen bagian dari objek dihubungkan oleh node [7]. Area masalah umum yang menarik termasuk bidang tradisional analisis struktural, perpindahan panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensi elektromagnetik. Rumusan FEA dari masalah nilai batas akhirnya menghasilkan sistem persamaan aljabar.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Adapun tahapan-tahapan yang dilalui dalam penelitian adalah ditunjukkan pada Gambar 3.

A. Studi Literatur

Dilakukan studi literatur dengan cara mencari dan mengumpulkan jurnal maupun buku mengenai ilmu yang terkait dengan penelitian ini. Penelitian ini membahas mengenai perambatan retak, maka dari itu dikumpulkan jurnal, buku, atau referensi lainnya mengenai perambatan retak untuk dijadikan referensi dan untuk menambah wawasan dalam pengerjaan.

B. Pengumpulan Data

Data kapal yang digunakan adalah kapal LNG Polar Eagle. Kapal Polar Eagle merupakan salah satu dari dua kapal LNG dengan tangki SPB yang diproduksi oleh Ishikawajima-Harima Heavy Industries. Data pertama yang didapatkan adalah dimensi utama kapal dan data selanjutnya yang didapatkan adalah *midship section* dan *general arrangement* dari kapal Polar Eagle yang didapatkan dari sumber berupa jurnal dan *website* resmi Ishikawajima-Harima Heavy Industries.

C. Perhitungan Pembebanan

Beban yang digunakan pada penelitian adalah beban tangki dan beban muatan LNG. Untuk beban tangki, pemodelan bentuk tangki dilakukan pada aplikasi elemen hingga, sedangkan untuk beban LNG menggunakan rumus beban alas dalam yang terdapat pada aturan BKI Vol. II, *Section 4*. Besarnya beban alas dalam dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P_t = 9,81 \frac{G}{V} \cdot h(1 + a_v)$$

dimana:

G = Massa dari muatan (ton)

V = Volume muatan (m³)

h = Tinggi muatan dari alas dalam (m)

a_v = Faktor akselerasi

D. Analisis Model Global

Model global berupa tangki SPB dan pondasi tangki dibuat pada aplikasi AutoCAD untuk mendapatkan tampilan model 3 dimensi. Model 3D ini dijadikan dasar untuk pemodelan model global pada aplikasi elemen hingga. Tangki SPB berbentuk prisma dan diperkuat oleh konstruksi di dalam tangki. Tujuan memodelkan tangki dan pondasi tangki sebagai model global adalah untuk mengetahui bagaimana respon pondasi atau seberapa besar nilai tegangan yang dialami oleh pondasi disaat pondasi menopang tangki dan muatan LNG seperti pada kondisi nyata. Bentuk model disesuaikan dengan *midship section* dan beberapa referensi jurnal mengenai tangki IHI-SPB. Model 3D tangki dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Material yang digunakan untuk tangki adalah *aluminium alloy 5083-O* yang memiliki massa jenis 2660 kg/m³, *modulus young* 71 GPa, dan *poisson ratio* 0,33. Dan untuk model pondasi tangki menggunakan material baja ASTM A36 yang memiliki massa jenis 7850 kg/m³, *modulus young* 200 GPa, dan *poisson ratio* 0,3.

Kondisi batas diberikan pada area *after end* dan *fore end* tangki. Penguncian dilakukan pada arah translasi x, y, dan z, sedangkan rotasi dibebaskan. Pemberian kondisi batas juga diberikan pada bagian bawah kaki pondasi dengan penguncian arah translasi x dan z, sedangkan translasi y dan rotasi dibebaskan. Pemberian kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

E. Analisis Model Lokal

Setelah melakukan analisis model global, dilanjutkan dengan analisis model lokal. Model lokal didapatkan dari hasil analisis model global, dimana model lokal merupakan lokasi yang mengalami tegangan paling kritis atau biasa disebut *hotspot area*. Model lokal pada penelitian ini adalah pondasi tangki dengan ketebalan 15 mm dan untuk kotak *reinforced plywood* pada bagian atas pondasi tidak digunakan dalam analisis. Model pondasi digambar terlebih dahulu dengan menggunakan *software* AutoCAD sebagai dasar untuk pemodelan di aplikasi elemen hingga. Model lokal 3D dapat dilihat pada Gambar 8.

Beban yang diaplikasikan merupakan beban tarik menggunakan tegangan normal sumbu x maksimal yang didapatkan dari hasil analisis pada model global. Beban diberikan di bagian kiri pondasi, sedangkan kondisi batas diberikan di bagian kanan. Untuk kondisi batas, *ke-6 degree of freedom* dikunci. Pemberian beban dan kondisi batas dapat dilihat pada Gambar 9.

F. Perhitungan Stress Intensity Factor (SIF)

Pada tahap ini, dilakukan perhitungan nilai faktor intensitas tegangan dengan menjalankan simulasi pada aplikasi elemen hingga. Mode retak yang digunakan adalah mode I (*opening*) dan dimodelkan seperti pada Gambar 10.

G. Perhitungan Koreksi Nilai SIF

Nilai SIF dikoreksi dengan membandingkan nilai SIF hasil analisis pada aplikasi elemen hingga dengan nilai SIF hasil perhitungan dengan rumus empiris dengan $f(g)$ sebesar 1,12. Namun, dikarenakan model pondasi tangki yang kompleks, nilai koreksi SIF sangat berbeda. Oleh karena itu dibuat model pelat sederhana untuk membandingkan apakah nilai SIF pada aplikasi elemen hingga sudah sesuai dengan nilai SIF menggunakan rumus empiris.

H. Analisis Perambatan Retak

Pada tahap ini akan dilakukan perhitungan laju perambatan retak dengan konsep *fracture mechanics*.

I. Pembahasan Hasil Analisis

Pada tahap ini dilakukan pembahasan mengenai hasil *stress intensity factor* dan nilai laju perambatan retak yang sudah didapatkan dari analisis.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Model Global

Tujuan dari analisis model global adalah untuk mendapatkan tegangan kritis yang terjadi. Tegangan yang dianalisis merupakan tegangan normal maksimum terhadap sumbu x atau searah dengan lebar tangki. Beban yang diaplikasikan merupakan beban LNG dengan variasi

pengisian 75% dan 50%. Sebelum melakukan simulasi, model global harus konvergen terlebih dahulu. Berikut hasil simulasi dan konvergensi model global dengan tolak ukur berupa nilai tegangan ekuivalen maksimum yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 11.

Seiring berkurangnya ukuran elemen, hasil yang didapatkan akan berbeda dan berurutan [8]. Model global konvergen pada ukuran *mesh* 600 mm dikarenakan nilai *error* pada ukuran *mesh* 600 mm di bawah 5%. Maka dari itu untuk analisis pada model global menggunakan *mesh* ukuran 600 mm dengan jumlah elemen 45.001 dan tegangan ekuivalen maksimum sebesar 150,3 MPa. Setelah konvergensi, dilakukan analisis dengan memberikan beban berupa *pressure* pada bagian alas tangki sebesar 68.509 Pa atau 0,068 MPa untuk 75% pengisian LNG dan 45.433 Pa atau 0,045 MPa untuk 50% pengisian LNG. Hasil simulasi dapat dilihat Gambar 12 dan Gambar 13.

Berdasarkan Gambar 12 dan Gambar 13 didapatkan nilai tegangan normal terhadap sumbu x maksimum sebesar 78,3 MPa untuk pengisian LNG 75% dan 58,47 MPa untuk pengisian LNG 50%. Nilai tegangan normal ini yang akan digunakan sebagai beban tarik dalam analisis retak pada pondasi tangki.

B. Analisis Model Lokal

Sebelum melakukan analisis retak, model lokal harus melewati proses konvergensi terlebih dahulu. Dimanadalam proses konvergensi, retak awal sudah dimodelkan dan pemberian beban dan kondisi batas sesuai dengan Gambar 9. Berikut hasil konvergensi model lokal dengan nilai tegangan pada ujung retak awal sebagai tolak ukur seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 14.

Model lokal konvergen pada ukuran *mesh* 75 mm dikarenakan nilai *error* pada ukuran *mesh* 75 mm di bawah 5%. Maka dari itu, untuk analisis model lokal menggunakan *mesh* ukuran 75 mm dengan jumlah elemen sebanyak 3819 dan nilai tegangan pada ujung retak sebesar 248 Mpa.

C. Analisis Stress Intensity Factor

Analisis *crack* dilakukan pada pondasi tangki. Mode retak yang digunakan adalah mode I (*opening*) dengan beban tarik berupa tegangan normal sumbu x maksimum yang didapatkan dari hasil analisis model global. Panjang retak awal adalah 10 mm dan *increment* retak sebesar 10 mm hingga panjang retak kritis, dimana pada panjang retak kritis nilai K_{IC} atau nilai SIF sudah menyentuh atau melebihi nilai K_{IC} .

K_{IC} atau *fracture toughness* merupakan kemampuan material untuk menahan beban atau deformasi yang terjadi akibat retak. Nilai K_{IC} untuk baja ASTM A36 adalah 44,7 MPa \sqrt{m} atau 40,68 Ksi \sqrt{in} [9].

Tabel 3 dan Gambar 15 menjelaskan nilai *stress intensity factor* pada setiap perpanjangan retak pada pengisian LNG 75%. Retak bermula dengan panjang 10 mm dan bertambah panjang 10 mm hingga panjang retak kritis 220 mm dengan nilai SIF sebesar 46,6 MPa \sqrt{m} . Tabel 4 dan Gambar 16 menjelaskan nilai *stress intensity factor* pada setiap perpanjangan retak pada pengisian LNG 50%. Retak bermula dengan panjang 10 mm dan bertambah panjang 10 mm hingga panjang retak kritis 280 mm dengan nilai SIF sebesar 44,77 MPa \sqrt{m} .

D. Hasil Analisis ΔK

ΔK merupakan rentang antara nilai K maksimum dan nilai K minimum. Dalam analisis pondasi tangki, nilai K minimum tidak dapat diasumsikan sebagai nol dikarenakan pada saat tangki tidak bermuatan, pondasi tetap menopang beban dari tangki itu sendiri. Oleh karena itu dilakukan perhitungan berat tangki yang dimana beban tangki ini akan disimulasikan terhadap pondasi tangki.

Setelah melakukan perhitungan, didapatkan berat tangki kosong sebesar 514,56 ton atau 514.560 kg. Berat dikonversikan menjadi 5.145,6 kN dan dibagi rata dengan jumlah pondasi yang terdapat pada tangki dan didapatkan nilai 205,82 kN untuk setiap pondasi. Nilai ini akan dikonversikan menjadi *pressure* dengan cara membagi nilai tersebut dengan luas pelat atas pondasi sebesar 2,56 m². Maka didapatkan *pressure* sebesar 80.400 Pa atau 0,08 MPa untuk setiap pondasi.

Setelah mendapatkan nilai *pressure* untuk setiap pondasi, dilakukan simulasi pada model pondasi dimana *pressure* diaplikasikan menekan pondasi dari atas. Tujuan dari simulasi ini untuk mendapatkan tegangan normal maksimum pada arah sumbu x yang akan dijadikan beban tarik untuk mendapatkan nilai *stress intensity factor* minimum. Nilai SIF minimum akan digunakan untuk mendapatkan nilai ΔK . Rumus dari ΔK adalah sebagai berikut:

$$\Delta K = K_{maks} - K_{min}$$

E. Hasil Analisis Laju Perambatan Retak

Untuk menghitung nilai laju perambatan retak menggunakan rumus (3) dengan konstanta $C = 3,6 \times 10^{-10}$ dan $m = 3$ untuk baja A36 [5]. Konstanta ini berlaku untuk ΔK_I dengan satuan $Ksiv\sqrt{in}$.

Tabel 5 menunjukkan nilai laju perambatan retak pada pengisian LNG 75% dan 50%. Untuk pengisian LNG 75% dengan panjang retak awal 0,39 *inch* menuju panjang retak 0,79 *inch* didapatkan nilai laju perambatan retak sebesar $1,41 \times 10^{-7}$ *in/cycle*. Nilai ini menunjukkan bahwa dalam satu siklus (1 siklus beban = 15 hari) terjadi pertambahan panjang retak sebesar $1,41 \times 10^{-7}$ *inch*. Untuk pengisian LNG 50% dengan panjang retak awal 0,39 *inch* menuju panjang retak 0,79 *inch* didapatkan nilai laju perambatan retak sebesar $5,38 \times 10^{-8}$ *in/cycle*. Nilai ini menunjukkan bahwa dalam satu siklus terjadi pertambahan panjang retak sebesar $5,38 \times 10^{-8}$ *inch*.

Kemudian, untuk pengisian LNG 75%, dengan panjang retak 8,27 *inch* menuju panjang retak kritis 8,66 *inch* didapatkan nilai laju perambatan retak sebesar $2,21 \times 10^{-5}$ *in/cycle*. Nilai ini menunjukkan bahwa dalam satu siklus

terjadi pertambahan panjang retak sebesar $2,21 \times 10^{-5}$ *inch*. Untuk pengisian LNG 50% dengan panjang retak 10,63 *inch* menuju panjang retak kritis 11,02 *inch* didapatkan nilai laju perambatan retak sebesar $1,88 \times 10^{-5}$ *in/cycle*. Nilai ini menunjukkan bahwa dalam satu siklus terjadi pertambahan panjang retak sebesar $1,88 \times 10^{-5}$ *inch*.

V. KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi menggunakan *software* elemen hingga dan perhitungan numerik, maka, didapatkan kesimpulan Tugas Akhir sebagai berikut: (1) Untuk pengisian LNG 75% didapatkan panjang retak kritis sebesar 220 mm dengan nilai SIF sebesar 46,6 MPa \sqrt{m} dan untuk pengisian LNG 50% didapatkan panjang retak kritis sebesar 280mm dengan nilai SIF sebesar 44,77 MPa \sqrt{m} . (2) Untuk pengisian LNG 75% didapatkan nilai laju perambatan retak pada panjang retak 8,27 *inch* menuju panjang retak kritis sebesar $2,21 \times 10^{-5}$ *in/cycle* dan untuk pengisian LNG 50% didapatkan nilai laju perambatan retak pada panjang retak 10,63 *inch* menuju panjang retak kritis sebesar $1,88 \times 10^{-5}$ *in/cycle*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. P. Nuswantara, W. Priharnanto, and G. Wibawa, "Regasification of lng (liquefied natural gas)," *J. Tek. ITS*, vol. 3, no. 2, pp. B149--B152, 2014, doi: 10.12962/j23373539.v3i2.6438.
- [2] Z. Maulidah, "Analisa Kekuatan Support/Pondasi Tabung Mini LNG pada Barge," Departemen Teknik Perkapalan, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.
- [3] O. Kurdi, "Pemilihan jenis pembebanan statik untuk analisa tegangan heavy duty truck chassis menggunakan metode elemen hingga," *ROTASI*, vol. 21, no. 3, pp. 181--186, 2019, doi: 10.14710/rotasi.21.3.181-186.
- [4] S. H. Sujiatanti, S. Tanaka, S. Shinkawa, and D. Yanagihara, "2019S-GS10-1 Computational and Experimental analysis of a cracked panel under tensile and compressive loads," in *Conference Proceedings The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers 28*, 2019, Japan: 03-04 June 2019, pp. 301--308. doi: 10.14856/conf.28.0_301.
- [5] J. M. Barsom and S. T. Rolfe, *Fracture and Fatigue Control in Structures: Applications of Fracture Mechanics*, 3rd ed. California: ASTM International, 1999. doi: 9780803120822.
- [6] M.-S. Lee and M.-H. Kim, "Fatigue crack growth evaluation of IMO type B spherical LNG cargo tank considering the effect of stress ratio and load history," *J. Weld. Join.*, vol. 40, no. 1, pp. 40--47, 2022, doi: 10.5781/JWJ.2022.40.1.5.
- [7] M. M. Gunawan, A. Zubaydi, S. H. Sujiatanti, and R. C. Ariesta, "Analisis crack pada transverse corrugated bulkhead kapal tanker menggunakan metode elemen hingga," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 1, pp. G1--G6, 2023, doi: 10.12962/j23373539.v12i1.92245.
- [8] Z. Rabbani, A. Zubaydi, and S. H. Sujiatanti, "Analisa kekuatan sekat bergelombang kapal tanker menggunakan metode elemen hingga," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 2, pp. G228--G233, 2019, doi: 10.12962/j23373539.v7i2.33232.
- [9] M. A. Budiman, M. N. Misbah, and T. Yulianto, "Studi kepecahan moda kegagalan material A36 dengan variasi panjang retak terpusat," *J. Tek. ITS*, vol. 8, no. 1, pp. G40--G44, 2019, doi: 10.12962/j23373539.v8i1.38648.