

PREDIKSI SISA UMUR SAMBUNGAN TUBULAR ASIMETRIS MULTI BIDANG MENGGUNAKAN METODE *FRACTURE MECHANICS*

Fuad Mahfud Assidiq¹⁾ dan Syerly Klara²⁾

¹⁾Teknik Perancangan Bangunan Laut, Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

²⁾Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Universitas Hasanuddin

Email: fuadassidiq9@gmail.com

Abstrak

Jenis *platform* minyak dan gas yang paling banyak beroperasi di perairan Indonesia ialah jenis terpancang (*fixed jacket*). Jenis struktur ini dalam proses perancangan mempertimbangkan beban kerja salah satunya beban dinamis dimana variasi amplitudo beban terakumulasi selama operasi hingga menyebabkan *crack* pada material tubular multi bidang. Potensi *crack* akan diselidiki untuk memprediksi sisa umur struktur saat kondisi badai 100 tahunan dengan dibandingkan antara metode analitik dan *Finite Element Method* (FEM). Struktur tersebut akan menerima beban berasal dari gaya aksial (AX), *in plane bending* (IPB) dan *out plane bending* (OPB) hingga diperoleh *Unity Check* (UC) senilai 0,572 terletak pada *brace* 3071-3007 dibagian *saddle*. Perbandingan kedua metode tersebut mendeskripsikan *Stress Intensity Factor* (SIF) bernilai minim kesalahan dalam memodelkan tegangan diujung *crack*. Pemodelan *crack* pun berjenis *surface crack* dengan kondisi *opening mode* akibat tegangan normal tarik. Simulasi *crack* dilakukan untuk menentukan sisa umur berdasarkan *fracture mechanics* dengan menggunakan hukum Paris-Erdogan. Sisa umur kelelahan diperoleh berkisar 45,501 tahun dengan metode analitik serta 45,390 tahun dengan FEM sehingga struktur memenuhi kriteria kelayakan operasi selama 20 tahun kedepan.

Kata kunci: *crack, fracture mechanics, sisa umur, tubular*

PENDAHULUAN

Fixed Jacket Platform merupakan jenis platform yang banyak digunakan di perairan laut Indonesia untuk mengeksploitasi hidrokarbon khususnya minyak dan gas bumi. Saat mendesain sebuah struktur lepas pantai, salah satu beban yang harus dipertimbangkan yakni beban dinamis dimana beban yang memiliki nilai, arah dan jumlah yang berbeda serta terjadi secara berulang diterima oleh struktur sehingga menyebabkan kelelahan. Kelelahan terjadi karena adanya akumulasi beban siklik yang mengenai struktur saat struktur sedang beroperasi sehingga dapat mengakibatkan retak (*crack*) akibat kelelahan dari material (Anderson, 2005). Apabila *crack* dibiarkan terus menerus, akumulasi tegangan pada sambungan las - lasan *joint* struktur terus meningkat akibat beban lingkungan, sehingga perambatan *crack* menjadi lebih cepat yang dapat mengakibatkan kepecahan (*fracture*) (Ersdal G. dan Langen I., 2002). Pada umumnya, struktur lepas pantai terpancang didesain mulai 20 sampai 25 tahun masa operasi. Namun pada kenyataannya, setelah melewati umur operasi kandungan hidrokarbon di suatu *field* tersebut masih tersedia dan menguntungkan bila dieksploitasi lebih lanjut. Oleh karena itu, untuk menghemat biaya pembuatan platform yang baru, platform lama mesti diperpanjang umur operasi dengan memperhitungkan umur struktur yang masih tersisa agar eksploitasi hidrokarbon tersebut berjalan aman. Setelah dilakukan perpanjangan umur masa pakai platform, perlu dilakukan *re-assessment* struktur untuk memastikan bahwa struktur layak untuk dioperasikan kembali selama rencana waktu perpanjangan eksploitasi hidrokarbon. Dari permasalahan tersebut, prediksi umur sisa operasi struktur berdasarkan kelelahan dengan metode *fracture mechanics* pada platform beroperasi lebih dari 25 tahun dan direncanakan untuk perpanjangan umur operasi 20 tahun kedepan menjadi tujuan utama penelitian ini.

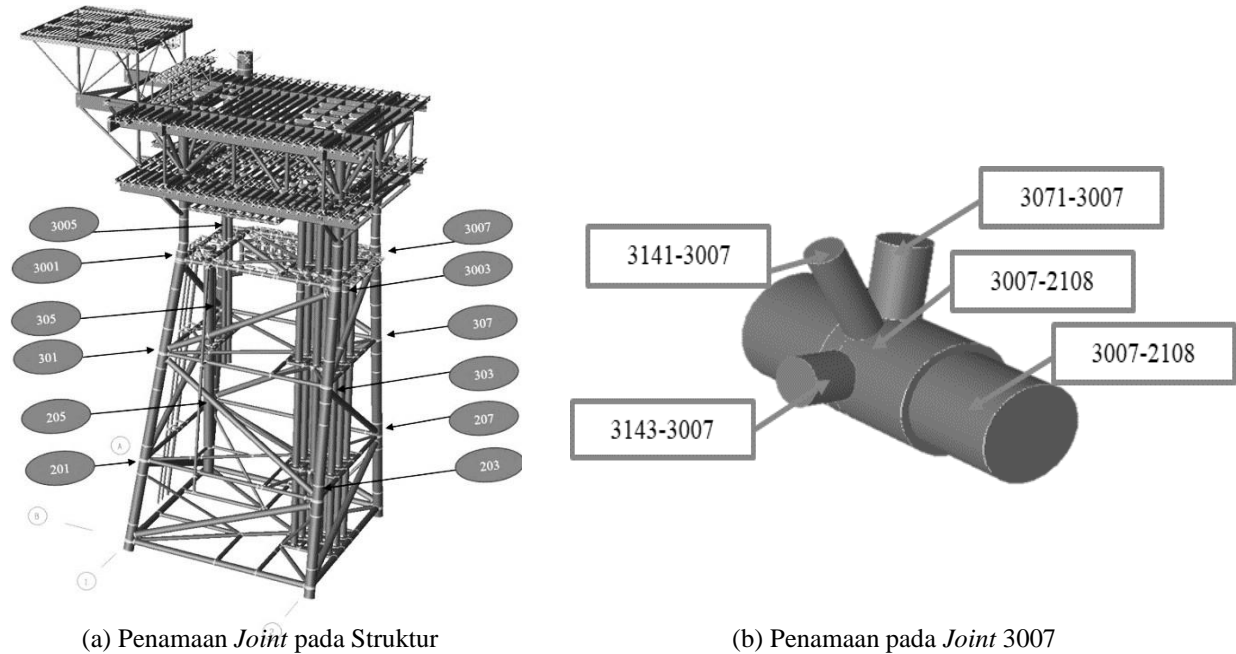
PEMODELAN STRUKTUR

Pemodelan global struktur *fixed jacket platform* menggunakan bantuan software berbasis FEM (*Finite Element Method*). Setelah dimodelkan maka dilakukan validasi *selfweight* merujuk kepada *selfweight* dalam laporan FEED (*Front End Engineering Design*) untuk membuktikan apakah metode pemodelan numerik yang digunakan mampu



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

menghasilkan analisa yang tidak jauh berbeda dengan hasil laporan FEED. Hasil validasi menunjukkan bahwa pemodelan *platform* telah sesuai dengan keadaan sebenarnya sehingga dapat dikaji *inplace analysis* lebih lanjut seperti pada Tabel 1. Untuk mengetahui perpanjangan umur operasi *platform* dalam kurun waktu 20 tahun kedepan dikatakan aman maka pembebanan saat *inplace analysis* yang memuat beban gelombang laut, beban arus laut dan beban *marine growth* dalam kondisi badai 100 tahunan (*100-years storm condition*).



Gambar 1. Penamaan pada Platform

Tabel 1. Validasi *Selfweight* Pemodelan Platform

<i>Selfweight</i> FEM (kips)	<i>Selfweight</i> Laporan FEED (kips)	Koreksi (%)
2.576,42	2.513,11	2,46

Tabel 2. Peringkat *Unity Check* tertinggi pada *Joint* Struktur *Fixed Jacket Platform*

Peringkat	<i>Joint</i>	Diameter	Thickness	Yield Strength	Unity Check
1	3007	42,000	1,500	36.000	0,572
2	3001	42,000	1,500	36.000	0,470
3	3003	42,000	1,500	36.000	0,314
4	3005	42,000	1,500	36.000	0,289
5	203	42,000	1,500	36.000	0,288
6	205	42,000	1,500	36.000	0,287
7	207	42,000	1,500	36.000	0,242
8	301	42,000	1,500	36.000	0,225
9	307	42,000	1,500	36.000	0,189
10	201	42,000	1,500	36.000	0,173

Tabel 3. Geometri Pemodelan *Joint* 3007

Member	Thickness (in)	Outside Diameter (in)	Length (ft)
--------	-------------------	--------------------------	----------------



3143-3007	0,375	12,750	7,44*
3141-3007	0,750	18,000	10,50*
3071-3007	0,625	18,000	10,50*
3007-2108	1,500	42,000	24,38*
3007-2095	1,500	40,500	18,65*

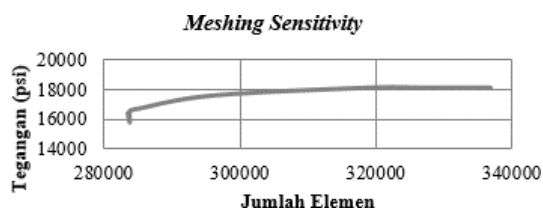
*berdasarkan penelitian Jiang et al (2018)

Tabel 4. Pembebanan pada tiap *Brace* pada *Joint* 3007

<i>Load Case</i>	<i>Joint</i>		
	3071-3007	3143-3007	3141-3007
Max F_x (in)	-78.014	-20.457	4.545
M_y (in.lbf)	$-1,31 \times 10^6$	$-3,74 \times 10^5$	$-1,59 \times 10^6$
M_z (in.lbf)	$7,62 \times 10^5$	6.932	$3,41 \times 10^5$
Min F_x (in)	-77.860	-20.642	3.695
M_y (in.lbf)	$-1,32 \times 10^6$	$-3,39 \times 10^5$	$-1,60 \times 10^6$
M_z (in.lbf)	$7,67 \times 10^5$	7.031	$3,59 \times 10^5$

Setelah melakukan *global analysis* pada struktur, maka diperoleh titik yang memiliki *Unity Check* (UC) tertinggi pada *jacket leg* terletak pada *joint* 3007 pada elevasi (+) 9.67 ft. seperti ditunjukkan pada Gambar 1.(a). dan Tabel 2. Dalam penentuan *re-assessment existing platform*, nilai UC pada struktur lebih besar dari satu maka perlu dianalisis lokal. Analisis lokal tersebut agar memberikan detail perhitungan serta meninjau *yield strenght* material tersebut maka perlu dilakukan *maintenance* lebih terperinci (API RP 2A WSD, 2005). Semua *joint* pada *platform* mempunyai nilai UC dibawah satu, namun nilai UC dapat berubah seiring dengan timbulnya *crack* pada sambungan *chord-brace* tersebut. Setelah simulasi *global analysis* dilakukan, *joint* 3007 yang bernilai UC tertinggi akan dimodelkan untuk melakukan *local analysis*. *Joint* 3007 merupakan sambungan tubular multi bidang dimana bagian diameter *chord* 3007-2108 dan 3007-2108 tidak sama. Pada umumnya, diamater *chord* yang dianalisis bernilai sama. Akan tetapi, pada penelitian ini menggunakan *chord* yang berdiameter asimetris. Geometri *joint* 3007 ditunjukkan pada Tabel 3.. Pembebanan gaya dan momen diperoleh dari gaya aksial (AX), *In-Plane Bending* (IPB) dan *Out-Plane Bending* (OPB) melalui hasil *inplace analysis* yang dilakukan pada setiap *joint* yang terdapat pada tiap *brace*. Selain itu, kedua ujung *chord* dalam kondisi *fixed support*. Pembebanan dilakukan dengan memberikan gaya dan momen pada ketinggian maksimum dan minimum yang didapatkan dari arah pembebanan signifikan saat kondisi *100-years strom condition*. Berikut hasil pembebanan pada *joint* 3007 pada Gambar 1.(b) dan Tabel 4.

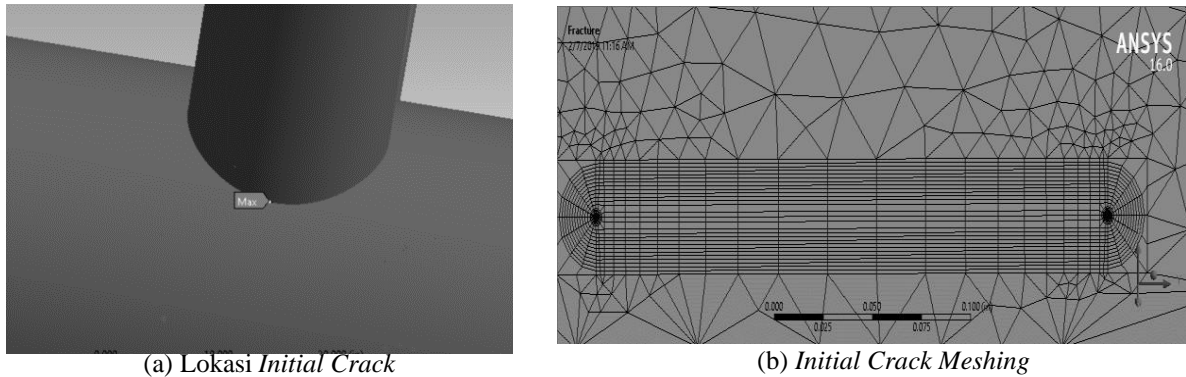
Dalam melakukan analisis model, proses *meshing sensitivity* mesti dilakukan untuk mengukur keakuratan *output* dari pemodelan *local analysis* akibat dari variasi penggunaan jumlah elemen. Elemen yang digunakan adalah jenis elemen solid. Nilai pembebanan pada analisis model bernilai sama namun yang divariasikan ialah parameter jumlah elemen. Hasil *meshing sensitivity* menunjukkan bahwa jumlah elemen berkisar 327.873 sampai 336.768 menghasilkan tegangan konstan sebesar 18.056 psi. Dengan demikian, jumlah elemen digunakan 327.873 agar menghemat durasi proses simulasi seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hasil Validasi *Meshing Sensitivity*

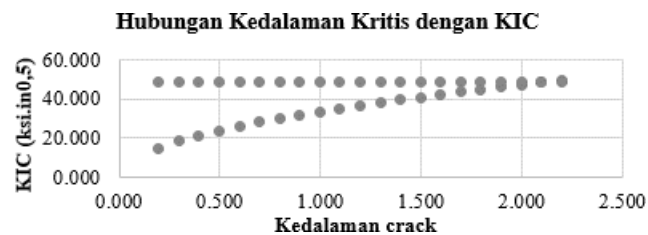
ANALISIS PERAMBATAN RETAK SAMBUNGAN TUBULAR

Setelah analisis *meshing sensitivity* selesai, maka dilakukan penentuan lokasi retak awal (*initial crack*). *Initial crack* ditentukan dengan melihat tegangan tertinggi pada tiap *member*. Lokasi *initial crack* pada analisis selanjutnya, tegangan maksimum pada *brace* 3071-3007 pada daerah *saddle* seperti Gambar 3(a). Untuk mendapatkan posisi letak dari *crack*, dapat diketahui dari nilai tegangan maksimum (σ_{maks}) dan minimum (σ_{min}) sebesar 29.697 psi dan 25.939 psi dengan selisih tegangan $\Delta\sigma$ adalah 3.758 psi.



Gambar 3. Pemodelan *Crack* pada *Brace* 3071-3007

Sebelum pemodelan *crack*, perlu diketahui terlebih dahulu yakni jenis *crack* dan kedalaman retak kritis dari material struktur. Jenis *crack* yang dimodelkan berjenis *surface crack* dengan kondisi deformasi moda-1 (*opening mode*) dimana *crack* paling dominan terhadap terbentuknya *initial crack* serta terjadi akibat adanya tegangan normal tarik yang menyebabkan terjadinya arah perambatan tegak lurus terhadap bidang *crack* (Rolfe dan Barsom, 1999). Nilai kritis didapatkan setelah mengetahui nilai K_{Ic} pada material. Nilai K_{Ic} untuk material A36 adalah 49 $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$ (Ashby et al, 2000). Perlu dipahami bahwa struktur dikatakan pecah ketika $K_I > K_{Ic}$. Dari Gambar 4 menunjukkan bahwa kedalaman kritis yang dapat menyebabkan *fracture* pada struktur ini senilai 2,197 inch Namun dikarenakan ketebalan tubular hanya 1,500 inch, maka diasumsikan *fracture* terjadi saat kedalaman *crack* sudah melebihi dari ketebalan tubular tersebut. Sehubungan dengan itu, geometri kedalaman *initial crack* (a) pada struktur diasumsikan 0,500 mm (DNV RP C203, 2008). Demikian pula perbandingan *crack depth* (a) dengan *crack length* (2c) diasumsikan 0,150 (ABS 0115, 2003). Sehingga pemodelan *meshing* geometri *crack* pada pemodelan numerik berbasis FEM dapat ditunjukkan pada Gambar 3(b).



Gambar 4. Grafik Pengaruh Kedalaman *Crack* dengan Nilai K_{Ic}

Tabel 5. Validasi *Stress Intensity Factor*

Validasi <i>SIF</i>			
<i>Load Case</i>	Analitik	FEM	Error (%)
Max	7673,075	7675,934	0,037
Min	6702,087	6720,663	0,276

Dalam melakukan analisis *crack* lebih lanjut, *Stress Intensity Factor* (SIF) menjadi parameter yang digunakan dalam mendeskripsikan nilai tegangan yang terjadi diujung *crack* dan digunakan untuk memprediksi sisa umur dari struktur yang mengalami kelelahan (*fatigue*). Berdasarkan geometri *crack* yang telah diketahui sebelumnya, hasil nilai SIF secara analitik akan divalidasikan dengan hasil SIF dari *software* berbasis FEM. Hasil validasi menunjukkan bahwa SIF secara analitik bernilai minim kesalahan dibandingkan dengan kondisi SIF dari *output software* sehingga dapat dikaji perhitungan perambatan *crack* lebih lanjut seperti pada Tabel 5.

Setelah melakukan perhitungan SIF terhadap *initial crack*, selanjutnya dilakukan perhitungan SIF terhadap perambatan retak dari dimulainya retak awal hingga mencapai kedalaman retak kritis. Perambatan ini akibat dominasi tegangan tarik (*macro crack growth stage*) sampai penampang komponen tidak dapat mendukung tegangan ijin hingga terjadi *final fracture* (Ribeiro A.S., et al, 2011). Menganalisis umur kelelahan dengan pendekatan *fracture mechanics* didapatkan dari pengintegralan hukum Paris – Erdogan. Adapun rangkuman hasil analisis perambatan *crack* menggunakan metode analitik dan metode numerik berbasis FEM dimuat pada Tabel 6. dan Tabel 7. Dari kedua tabel tersebut, diperoleh jumlah *cycle* pada struktur hingga mengalami *fracture* sebanyak 196.564.994,855 *cycles* dengan metode analitik dan 196.084.056,290 *cycles* dengan FEM. Prediksi umur dapat diperoleh dari fungsi jumlah *cycle* dengan periode beban lingkungan yang diterima struktur. Dengan kata lain, umur kelelahan struktur dengan menggunakan pendekatan *fracture mechanics* secara analitik serta numerik berbasis FEM ialah 45,501 tahun dan 45,390 tahun dengan *margin error* 0,0024%.

Tabel 6. Hasil Analisa Perambatan Retak menggunakan Metode Analitik

a (m)	a(in)	2c	a _{cr}	a _{vg}	K _i _{max} avg	K _i min avg	ΔK	Δa/ΔN	ΔN
0,0005	0,020	0,131	0,120	0,070	14,323	12,510	1,812	46.654.358,131	46.654.358,131
0,0006	0,024	0,157	0,124	0,074	14,722	12,859	1,863	42.962.514,828	89.616.872,958
0,0016	0,063	0,420	0,163	0,113	18,238	15,930	2,308	22.595.875,673	112.212.748,631
0,0026	0,102	0,682	0,202	0,152	21,178	18,498	2,680	14.430.638,050	126.643.386,681
0,0036	0,142	0,945	0,242	0,192	23,758	20,751	3,006	10.222.532,874	136.865.919,555
0,0046	0,181	1,207	0,281	0,231	26,083	22,782	3,301	7.724.934,223	144.590.853,779
0,0056	0,220	1,470	0,320	0,270	28,217	24,647	3,571	6.101.221,969	150.692.075,748
0,0066	0,260	1,732	0,360	0,310	30,201	26,379	3,822	4.976.108,304	155.668.184,052
0,0076	0,299	1,995	0,399	0,349	32,063	28,005	4,057	4.158.785,169	159.826.969,221
0,0086	0,339	2,257	0,439	0,389	33,822	29,542	4,280	3.543.041,034	163.370.010,255
0,0096	0,378	2,520	0,478	0,428	35,494	31,002	4,492	3.065.544,261	166.435.554,516
0,0106	0,417	2,782	0,517	0,467	37,091	32,397	4,694	2.686.431,834	169.121.986,350
0,0116	0,457	3,045	0,557	0,507	38,621	33,734	4,887	2.379.491,076	171.501.477,425
0,0126	0,496	3,307	0,596	0,546	40,094	35,020	5,074	2.126.851,689	173.628.329,115
0,0136	0,535	3,570	0,635	0,585	41,514	36,261	5,253	1.915.955,611	175.544.284,726
0,0146	0,575	3,832	0,675	0,625	42,887	37,460	5,427	1.737.746,826	177.282.031,552
0,0156	0,614	4,094	0,714	0,664	44,218	38,622	5,596	1.585.547,541	178.867.579,094
0,0166	0,654	4,357	0,754	0,704	45,509	39,750	5,759	1.454.337,030	180.321.916,124
0,0176	0,693	4,619	0,793	0,743	46,765	40,847	5,918	1.340.275,378	181.662.191,502
0,0186	0,732	4,882	0,832	0,782	47,988	41,916	6,073	1.240.380,950	182.902.572,452
0,0196	0,772	5,144	0,872	0,822	49,181	42,958	6,224	1.152.307,036	184.054.879,488
0,0206	0,811	5,407	0,911	0,861	50,346	43,975	6,371	1.074.184,080	185.129.063,569
0,0216	0,850	5,669	0,950	0,900	51,484	44,969	6,515	1.004.506,239	186.133.569,808
0,0226	0,890	5,932	0,990	0,940	52,597	45,941	6,656	942.048,486	187.075.618,294



0,0236	0,929	6,194	1,029	0,979	53,688	46,894	6,794	885.805,160	187.961.423,455
0,0246	0,969	6,457	1,069	1,019	54,757	47,827	6,929	834.943,792	188.796.367,247
0,0256	1,008	6,719	1,108	1,058	55,805	48,743	7,062	788.769,997	189.585.137,244
0,0266	1,047	6,982	1,147	1,097	56,834	49,642	7,192	746.700,477	190.331.837,722
0,0276	1,087	7,244	1,187	1,137	57,844	50,524	7,320	708.242,046	191.040.079,767
0,0286	1,126	7,507	1,226	1,176	58,838	51,392	7,446	672.975,179	191.713.054,947
0,0296	1,165	7,769	1,265	1,215	59,814	52,245	7,569	640.541,004	192.353.595,951
0,0306	1,205	8,032	1,305	1,255	60,776	53,085	7,691	610.630,910	192.964.226,861
0,0316	1,244	8,294	1,344	1,294	61,722	53,911	7,811	582.978,211	193.547.205,072
0,0326	1,283	8,556	1,383	1,333	62,653	54,725	7,928	557.351,384	194.104.556,457
0,0336	1,323	8,819	1,423	1,373	63,572	55,527	8,045	533.548,567	194.638.105,024
0,0346	1,362	9,081	1,462	1,412	64,477	56,318	8,159	511.393,040	195.149.498,064
0,0356	1,402	9,344	1,502	1,452	65,369	57,097	8,272	490.729,506	195.640.227,570
0,0366	1,441	9,606	1,541	1,491	66,250	57,866	8,384	471.420,995	196.111.648,565
0,0376	1,480	9,869	1,580	1,530	67,119	58,625	8,494	453.346,291	196.564.994,855

Tabel 7. Hasil Analisa Perambatan Retak menggunakan Metode Numerik Berbasis FEM

avg	K _{imaxavg}	K _{iminavg}	ΔK	N	ΔN
0,070	14,335	12,500	1,814	46.500.252,934	46.500.252,934
0,074	14,734	12,849	1,865	42.824.442,538	89.324.695,472
0,113	18,250	15,920	2,310	22.537.234,130	111.861.929,603
0,152	21,190	18,488	2,682	14.398.378,999	126.260.308,602
0,192	23,770	20,741	3,008	10.202.158,425	136.462.467,027
0,231	26,095	22,772	3,303	7.710.908,701	144.173.375,728
0,270	28,229	24,657	3,573	6.090.981,460	150.264.357,189
0,310	30,213	26,369	3,824	4.968.304,301	155.232.661,489
0,349	32,075	27,995	4,059	4.152.641,242	159.385.302,731
0,389	33,834	29,532	4,282	3.538.078,754	162.923.381,486
0,428	35,506	30,992	4,494	3.061.452,827	165.984.834,313
0,467	37,103	32,387	4,696	2.683.000,604	168.667.834,916
0,507	38,633	33,724	4,889	2.376.572,245	171.044.407,162
0,546	40,106	35,010	5,076	2.124.338,495	173.168.745,657
0,585	41,526	36,271	5,255	1.913.769,014	175.082.514,671
0,625	42,899	37,470	5,429	1.735.827,064	176.818.341,735
0,664	44,230	38,632	5,598	1.583.848,591	178.402.190,326
0,704	45,521	39,760	5,761	1.452.822,874	179.855.013,200
0,743	46,777	40,837	5,920	1.338.917,428	181.193.930,628
0,782	48,000	41,906	6,075	1.239.156,223	182.433.086,850
0,822	49,193	42,948	6,226	1.151.196,846	183.584.283,696
0,861	50,358	43,965	6,373	1.073.173,081	184.657.456,777
0,900	51,496	44,959	6,517	1.003.581,706	185.661.038,483
0,940	52,609	45,931	6,658	941.199,784	186.602.238,267
0,979	53,700	46,884	6,796	885.023,327	187.487.261,594
1,019	54,769	47,817	6,931	834.221,226	188.321.482,820

1,058	55,817	48,733	7,064	788.100,205	189.109.583,026
1,097	56,846	49,632	7,194	746.077,882	189.855.660,908
1,137	57,856	50,514	7,322	707.661,829	190.563.322,736
1,176	58,850	51,382	7,448	672.433,157	191.235.755,893
1,215	59,826	52,235	7,571	640.033,524	191.875.789,417
1,255	60,788	53,075	7,693	610.154,774	192.485.944,192
1,294	61,734	53,901	7,813	582.530,602	193.068.474,793
1,333	62,665	54,715	7,930	556.929,812	193.625.404,606
1,373	63,584	55,517	8,047	533.150,825	194.158.555,430
1,412	64,489	56,308	8,161	511.017,164	194.669.572,594
1,452	65,381	57,087	8,274	490.373,740	195.159.946,334
1,491	66,262	57,856	8,386	471.083,767	195.631.030,101
1,530	67,131	58,615	8,496	453.026,189	196.084.056,290

KESIMPULAN

Studi telah tuntas dilakukan untuk menyelidiki prediksi sisa umur *fixed jacket platform*. Validasi hasil perbandingan metode analitik dengan metode numerik sangat baik dalam investigasi sisa umur sambungan tubular asimetris multi bidang. Pemodelan *global analysis* dalam kondisi badai 100 tahunan dengan peninjauan dari gaya aksial, *in plane bending* dan *out plane bending* diperoleh UC terbesar senilai 0,572 pada *joint* 3007. Berkaitan dengan itu, hasil *local analysis* menunjukkan letak *initial crack* berada di area *saddle* pada *brace* 3071-3007 dilanjutkan perambatan *crack*. Oleh sebab itu, *platform* tersebut masih layak beroperasi untuk 20 tahun kedepan setelah dilakukan perbandingan *re-assessment* umur kelelahan *platform* menggunakan metode *fracture mechanics* setelah mengasumsikan adanya *initial crack* pada kaki *jacket* secara analitik dan numerik berbasis FEM. Sisa umur kelelahan *platform* mencapai 45,501 tahun secara analitik dan 45,390 tahun secara numerik dari inspeksi terakhir hingga *platform* mengalami kegagalan.

DAFTAR PUSTAKA

- ABS 0115. 2003, Guide for Fatigue Assessment of Offshore Structures, American Bureau of Shipping, United States of America.
- Anderson, T L. 2005, Fracture Mechanic, Fundamentals and Applications, Department of Mechanical Engineering Texas A & University College Station, Texas.
- API RP 2A WSD. 2005, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform, United States of America.
- Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W. dan Wadley, H. N. G. 2000, Metal Foams: A Design Guide, Boston, MA: Butterworth Hamilton.
- DNV RP C203. 2008, Fatigue Design Of Offshore Steel Structures, Det Norske Veritas, Norway.
- Ersdal, G., dan Langen, I., 2002, On Assessment of Existing Offshore Structure, Proc 12th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Kyushu, Japan.
- Jiang, Y., Yuan K., Cui H. 2018, Prediction of Stress Concentration Factor Distribution for Multi-planar Tubular DT-Joints under Axial Loads, Marine Structures.
- Ribeiro, A.S, Jesus, A.P., Costa, J.M., Borrego, L.P., dan Maeiro J.C. 2011, Variable Amplitude Fatigue Crack Growth Modelling, Mecânica Experimental Vol. 19 Pp: 33-44, Portugal.
- Rolfe, S. T., dan Barsom, J. M. 1999, Fracture and Fatigue Control in Structures : Application of Fracture Mechanics: Third Edition, ASTM: Philadelphia.

