

DESAIN DAN ANALISIS *PUSHOVER* ANJUNGAN LEPAS PANTAI EKSISTING SEBAGAI DASAR PERPANJANGAN MASA OPERASI

Muh. Fadel Hidayat Marzuki¹ dan Rildova²

Program Studi Sarjana Teknik Kelautan,
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

¹muhammadfadel403@gmail.com dan ²rildova@gmail.com

ABSTRAK

Saat ini sebagian besar perusahaan minyak dan gas sedang mempertimbangkan untuk melakukan *reuse* terhadap struktur anjungan lepas pantai eksisting. Solusi ini dianggap cukup strategis, karena melakukan desain dan konstruksi *platform* baru biasanya membutuhkan biaya yang jauh lebih mahal.

Pada Tugas Akhir ini, dimodelkan suatu *process platform* 8 (delapan) kaki milik PT Pertamina EP yang sudah eksisting sejak tahun 1974 yang terletak di perairan Laut Jawa. Studi kelayakan dalam rangka rekualifikasi *platform* dievaluasi dengan perangkat lunak *SACS 11.2* dengan standar sesuai *API RP 2A 22nd Edition*. Adapun analisis yang dilakukan diawali dengan analisis *inplace*. Ketika terdapat *overstress*, akan dilakukan *face check* dan desain lokal berupa *strengthening* dengan perangkat lunak *Section 4.0*. Selanjutnya evaluasi struktur akan dilanjutkan lewat analisis seismik dengan menggunakan pembebanan gempa *SLE* dan *DLE*. Ketika terdapat kegagalan akan dilakukan pencatatan komponen kritis dan akan diverifikasi dengan pemeriksaan daktilitas. Selain itu juga akan dilakukan analisis *spectral fatigue*. Jika terdapat komponen sambungan yang memiliki sisa umur kelelahan kritis, maka beberapa prosedur inspeksi dan perbaikan sambungan akan direkomendasikan. Berikutnya akan dilakukan analisis *pushover* guna memeriksa daktilitas dan rasio cadangan kekuatan (*RSR*) yang dimiliki oleh anjungan lepas pantai eksisting.

Berdasarkan hasil analisis *inplace*, dilakukan desain perkuatan terhadap member kritis yakni member 1529-1506 (*UC box* = 0.73; *UC plate* = 0.754) dan member 0846-6347 (*UC box* = 0.579; *UC plate* = 0.714). Selanjutnya dari analisis seismik diperoleh bahwa *pile* 107P memiliki *UC* sebesar 1.246. Berikutnya pada analisis *fatigue* diperoleh bahwa terdapat 17 buah *joint* yang memiliki umur kelelahan dibawah 130 tahun sehingga perlu diinspeksi dan diperbaiki. Adapun dari analisis *pushover* diperoleh bahwa *pile* 107P memiliki plastisitas yang masih akseptabel yakni sebesar 8.3% saat beban desain gempa *DLE*. Selain itu juga diperoleh nilai daktilitas yang memadai dimana nilai terkecil yang diperoleh adalah sebesar 2.85 (*pushover* badai dari arah Barat) Sedangkan untuk *RSR* diperoleh nilai terkecil sebesar 1.42 (*pushover* *DLE*).

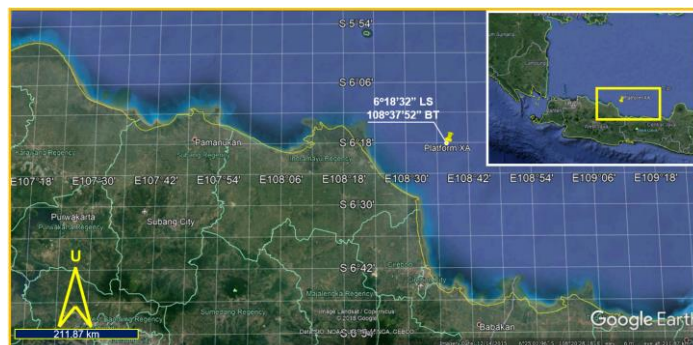
Kata kunci: *reuse*, *API RP 2A 22nd Edition*, *strengthening*, daktilitas, analisis *spectral fatigue*, analisis *pushover*, *RSR*.

PENDAHULUAN

Studi kelayakan dalam rangka rekualifikasi *platform* eksisting diawali dengan inspeksi awal meliputi stuktur atas dan substuktur guna memperoleh data-data terkait kondisi eksisting *platform*, selanjutnya struktur akan dievaluasi dengan melakukan analisis struktur (*inplace dan seismic*), menghitung sisa umur kelelahan (*fatigue*) *platform*, serta menghitung cadangan kekuatan (*pushover*) struktur. Setelah dilakukan analisis struktur terhadap kondisi dan pembebanan aktual dari *platform* eksisting, dapat diketahui komponen-komponen struktural yang mengalami kritis, inilah yang akan ditindaklanjuti dalam studi rekualifikasi *platform*.

Adapun langkah selanjutnya berupa mendesain perkuatan elemen (*strengthening*) yang bersifat lokal, melakukan justifikasi beban, merencanakan kegiatan inspeksi lanjutan, melakukan pemeriksaan non-destruktif dari material baja struktural, melakukan uji dan antisipasi mekanik dan kimia, melakukan penilaian korosi, melakukan perbaikan material baja, melakukan pembersihan terhadap biota laut, dll. Dengan begitu dapat direncanakan suatu langkah antisipasi, modifikasi maupun perbaikan yang tepat terkait rekualifikasi *platform* sebelum dioperasikan kembali untuk perpanjangan masa layan tertentu.

Struktur anjungan lepas pantai yang akan dimodelkan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini adalah struktur anjungan lepas pantai tipe tetap yang terletak pada wilayah Laut Jawa yang berjarak sejauh ± 36 km di bagian Timur Laut Kota Indramayu. Lokasi dari struktur tersebut terletak pada koordinat *latitude* $6^{\circ}18'32''$ LS dan koordinat *longitude* $108^{\circ}37'52''$ BT. Lokasi Struktur ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Lokasi XA Fixed Process Platform
(Sumber: Citra Google Earth, diakses pada 13 Agustus 2019)

TEORI DAN METODOLOGI

Pada analisis inplace akan dihitung kekuatan struktur ketika terpasang pada lokasi eksisting dan saat beroperasi maupun ketika badai. Pada kondisi operasi, semua beban mati dan hidup akan diterapkan bersama dengan beban lingkungan 1 tahunan. Pada kondisi badai, beban hidup yang bekerja akan tereduksi menjadi 75% dan diterapkan beban lingkungan 100 tahunan. Pada analisis inplace ini akan dilakukan pemeriksaan terhadap tegangan elemen, sambungan, kapasitas aksial *pile* serta defleksi struktur. Adapun perumusan pemeriksaan tegangan pada analisis inplace ditunjukkan pada **Pers 1**.

$$UC = \frac{\sigma_{actual}}{\sigma_{izin} \times AMOD} \quad \text{Pers.1}$$

keterangan

σ_{actual} : Tegangan aktual akibat beban yang bekerja pada *member* atau *joint*.

σ_{izin} : Tegangan izin sesuai dengan metode WSD atau LRFD yang berkaitan dengan kapasitas penampang baja.

$AMOD$: *Allowable stress modifier* yang merupakan faktor tegangan izin kerja sesuai *code* yang digunakan. Adapun menurut API RP 2A digunakan:
 $AMOD = 1.0$ untuk kondisi operasi; 1.33 untuk kondisi badai; 1.7 kondisi seismik

Pada analisis seismik, pengecekan yang sama dengan inplace akan dilakukan (tegangan, kapasitas aksial, defleksi), hanya saja pembebanan yang bekerja adalah beban akibat aktivitas seismik berupa gempa 200 tahunan (SLE) dan gempa 1000 tahunan (DLE).

Untuk perhitungan umur kelelahan struktur akan dilakukan analisis *fatigue* dengan metode spektral. Pada metode ini mula-mula dilakukan transformasi beban gelombang acak menjadi suatu spektrum kerapatan energi gelombang. Kemudian dilakukan analisis statik ekuivalen guna memperoleh fungsi transfer gaya dalam global struktur yang nantinya akan ditransformasi dengan memperhitungkan faktor konsentrasi tegangan hingga menjadi fungsi transfer rentang tegangan. Dengan memanfaatkan spektrum gelombang dan fungsi transfer rentang tegangan, dapat

dihitung spektrum tegangan yang bekerja pada struktur sebagaimana dirumuskan pada **Pers 2**.

$$RAO^2(stress) \times Wave Spectra = Stress Spectra$$

Pers. Error!
No text of
specified
style in
document.

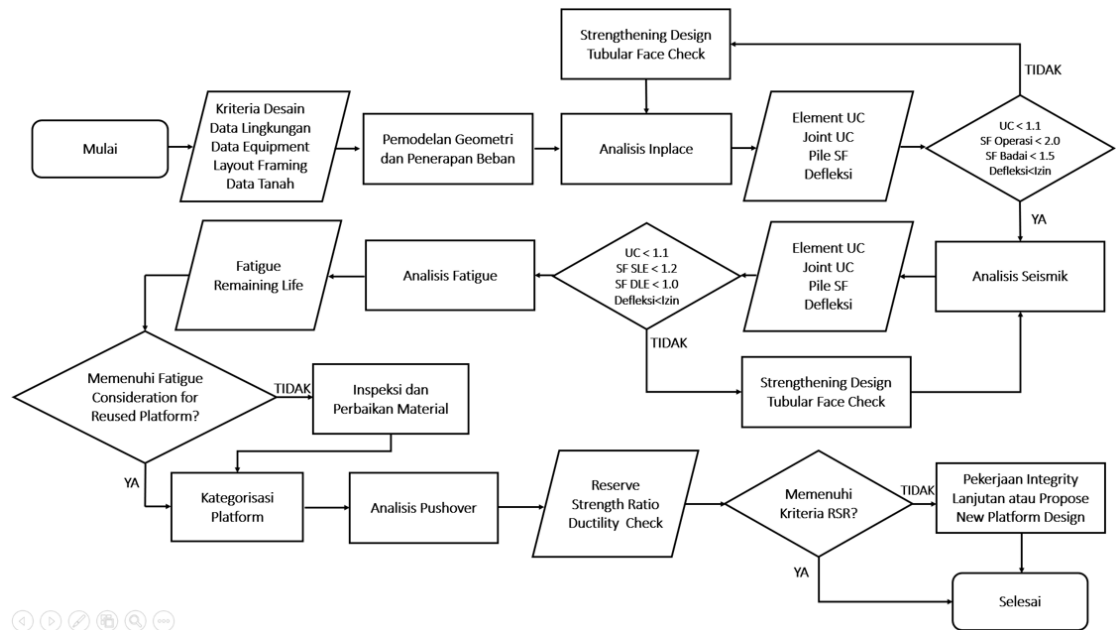
Dengan begitu dapat dihitung pula total ekspektasi kerusakan dan sisa umur layan sambungan.

Hal lain yang dilakukan adalah analisis *pushover*, yang mana analisis ini akan diperhitungkan cadangan kekuatan dan daktilitas yang dimiliki oleh struktur. Prinsip yang dilakukan adalah dengan menerapkan peningkatan beban pada struktur dan mencatat setiap deformasi yang terjadi hingga struktur mengalami keruntuhan. Ketika telah mengalami keruntuhan, akan dihitung besarnya rasio cadangan kekuatan (RSR) dan daktilitas (μ) yang dialami oleh struktur. Nilai ini akan dibandingkan dengan persyaratan yang telah ditentukan oleh *API RP 2A 22nd Edition*. Perumusan RSR dan daktilitas ditunjukkan pada **Pers 3** dan **Pers 4**.

$$RSR = \frac{Beban Struktur Saat Collapse}{Beban Struktur Saat Yield} \quad \text{Pers. 3}$$

$$\mu = \frac{Perpindahan Saat Collapse}{Perpindahan Saat Yield} \quad \text{Pers. 4}$$

Adapun diagram alir pengerjaan Tugas Akhir dijabarkan pada **Gambar 2** sebagai berikut:



Gambar 2 Diagram Alir Metodologi Tugas Akhir

HASIL DAN ANALISIS

Pada analisis *inplace*, semua hasil pemeriksaan terhadap *punching shear*, kapasitas aksial serta defleksi telah memenuhi syarat. Akan tetapi pada pemeriksaan tegangan elemen terdapat komponen yang mengalami kritis. Adapun hasil pemeriksaan tegangan elemen ditunjukkan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1 Hasil Analisa Tegangan Member Kondisi Operasi

Member	Grup	Posisi	Properti	Critical Condition	Critical Load Case	UC	Remarks
Kondisi Operasi (Perairan Max & Min)							
0846-6347	W12	Roof Deck Main Beam	W12x26	CM+BN	2006	1.24	NOT OK
6443-6442	W03	Roof Deck Secondary Beam	W10x22	TN+BN	2001	0.8	OK
0932-0184	T13	Main Deck Primary Beam	W24x76	TN+BN	3001	0.539	OK
1529-1506	W07	Main Deck Secondary Beam	W8x13	TN+BN	3004	1.561	NOT OK
0127-0248	T19	Cellar Deck Primary Beam	W24x76	TN+BN	3004	1.07	OK
0523-0154	W03	Cellar Deck Secondary Beam	W10x22	TN+BN	3006	0.628	OK
0126-0690	RS2	Cellar Deck Support	Tubular 8.625"x 0.375"	TN+BN	3003	1.13	NOT OK
708L-0127	DLG	Deck Leg	Tubular 30"x 1"	C>.15B	3002	0.769	OK
0127-1246	V11	Deck Bracing	Tubular 12.75"x 0.375"	C>.15A	3003	1.051	OK
1360-1355	HD2	Jacket El. (+) 10.00 ft	Tubular 10.75"x 0.356"	TN+BN	3003	1.17	NOT OK
0020-406	FC1	Jacket El. (-) 30.00 ft	Tubular 14"x 0.356"	C>.15A	3005	0.248	OK
0012-306L	FB1	Jacket El. (-) 70.00 ft	Tubular 16"x 0.362"	C>.15A	3005	0.204	OK
0004-206L	FA1	Jacket El. (-) 111.00 ft	Tubular 17.924"x 0.356"	HYDRO	2001	0.247	OK
104L-204L	A41	Bottom Jacket Leg	Tubular 34"x 0.478"	HYDRO	2001	0.761	OK
1145-0031	EB1	Diagonal Bracing	Tubular 14"x 0.368"	C>.15A	3006	1.049	OK
608L-708L	PL5	Pile Above Mudline	Tubular 30"x 1"	C>.15B	3001	0.791	OK
108P	PP1	Pile Below Mudline	Tubular 30"x 1"	CM	3003	0.64	OK

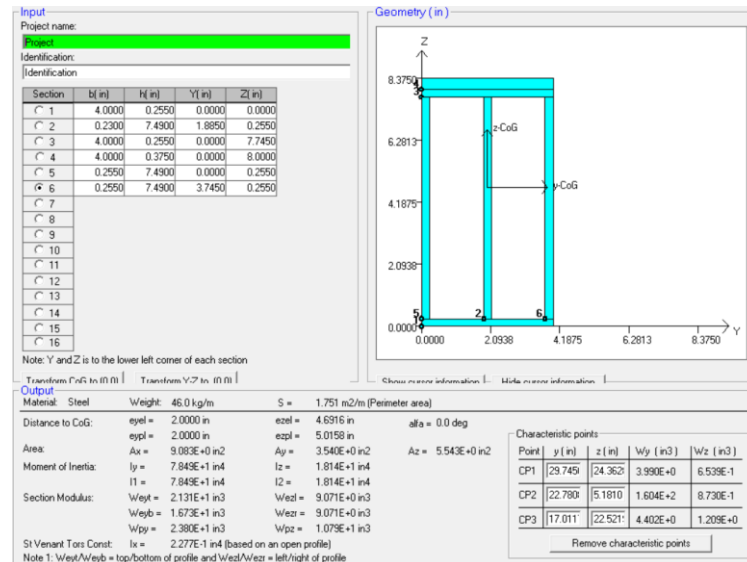
Tabel 2 Hasil Analisa Tegangan Member Kondisi Badai

Member	Grup	Posisi	Profil	Critical Condition	Critical Load Case	UC	Remarks
Kondisi Badai (Perairan Max & Min)							
0846-6347	W12	Roof Deck Main Beam	W12x26	CM+BN	4006	0.93	OK
6443-6442	W03	Roof Deck Secondary Beam	W10x22	TN+BN	5008	0.6	OK
0932-0184	T13	Main Deck Primary Beam	W24x76	TN+BN	5001	0.443	OK
1529-1506	W07	Main Deck Secondary Beam	W8x13	TN+BN	5007	1.174	NOT OK
0127-0248	T19	Cellar Deck Primary Beam	W24x76	TN+BN	4004	0.816	OK
0523-0154	W03	Cellar Deck Secondary Beam	W10x22	TN+BN	5005	0.462	OK
0126-0690	RS2	Cellar Deck Support	Tubular 8.625"x 0.375"	TN+BN	5003	0.85	OK
708L-0127	DLG	Deck Leg	Tubular 30"x 1"	C>.15B	4007	0.574	OK
0127-1246	V11	Deck Bracing	Tubular 12.75"x 0.375"	C>.15A	4003	0.754	OK
1360-1355	HD2	Jacket El. (+) 10.00 ft	Tubular 10.75"x 0.356"	TN+BN	5002	0.87	OK
405L-1192	FC1	Jacket El. (-) 30.00 ft	Tubular 14"x 0.356"	C>.15A	5005	0.253	OK
0012-306L	FB1	Jacket El. (-) 70.00 ft	Tubular 16"x 0.362"	C>.15A	5005	0.217	OK
0004-206L	FA1	Jacket El. (-) 111.00 ft	Tubular 17.924"x 0.356"	HYDRO	4001	0.186	OK
101L-201L	A11	Bottom Jacket Leg	Tubular 34"x 0.472"	HYDRO	4001	0.593	OK
1145-0031	EB1	Diagonal Bracing	Tubular 14"x 0.368"	C>.15A	4007	0.836	OK
202P-302P	PL2	Pile Above Mudline	Tubular 30"x 1"	C>.15A	5007	0.632	OK
108P	PP1	Pile Below Mudline	Tubular 30"x 1"	CM	4003	0.51	OK

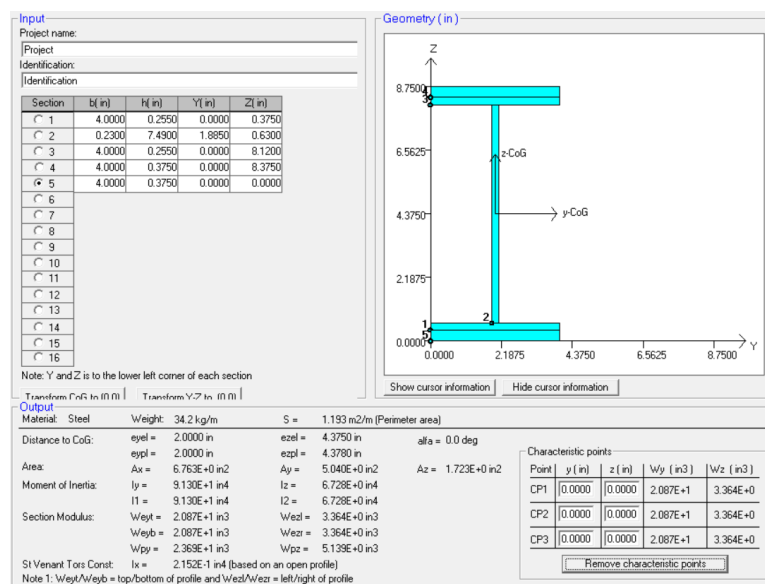
Berdasarkan hasil pemeriksaan tegangan, diperoleh bahwa terdapat 4 buah *member* yang mengalami kritis pada kondisi operasi dan 1 buah *member* pada kondisi badai. Sebagai tindakan penanganan, dilakukan desain lokal berupa perkuatan dan pengecekan *face check* terhadap *member-member* kritis tersebut sebagai berikut:

- Member 1529-1506

Desain perkuatan pada *member* 1529-1506 diajukan dalam 2 model yakni *box strengthening* (UC baru = 0.73) dan *plate strengthening* (UC baru = 0.754). Ilustrasi pemodelan *strengthening* ditunjukkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.



Gambar 3. Desain Box Strengthening Member 1529-1506

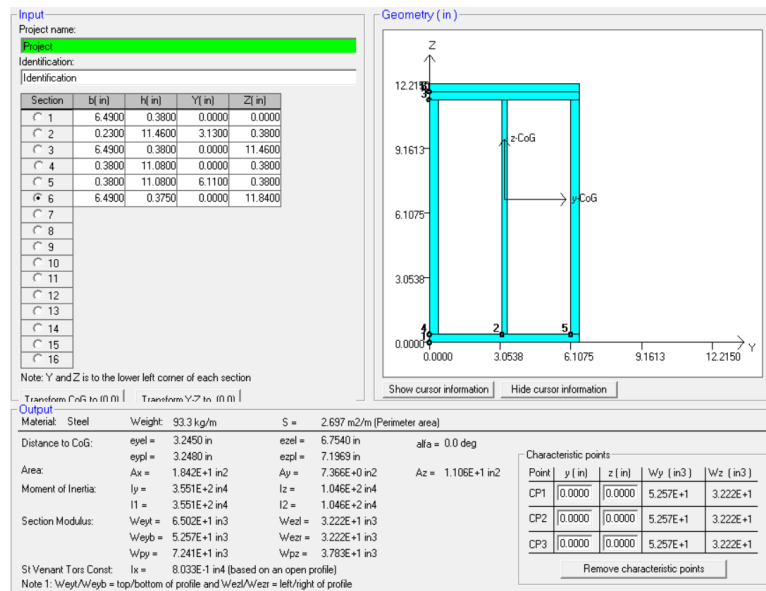


Gambar 4. Desain Plate Strengthening Member 1529-1506

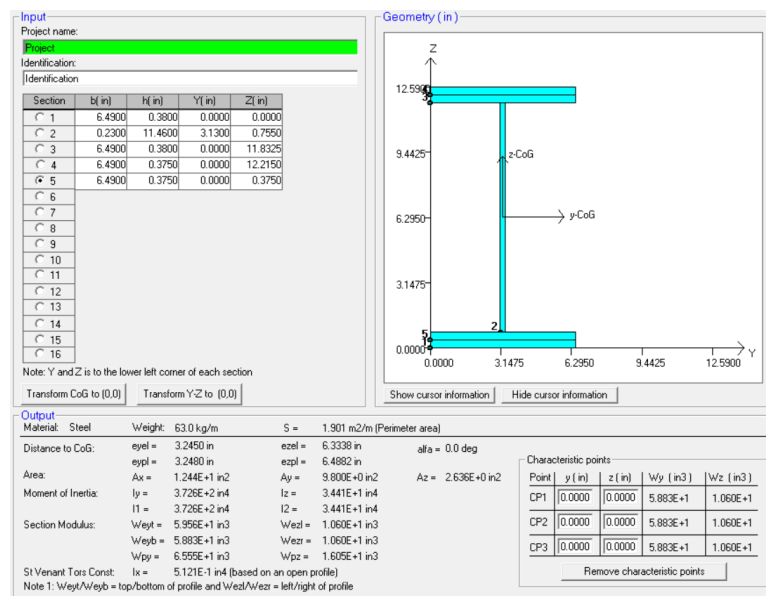
Desain terhadap 2 model *strengthening* untuk *member* 1529-1506 diatas dapat dipilih, kemudian dikonstruksi dan diletakkan dari ujung kiri penampang hingga ujung kanan penampang sepanjang 3.33 ft. Selain itu juga perlu ditambahkan komponen pengkaku (*stiffener*) pada kedua ujung *member* yang diberi perkuatan.

- Member 0846-6347

Desain perkuatan pada *member* 0846-6347 diajukan dalam 2 model yakni *box strengthening* (UC baru = 0.579) dan *plate strengthening* (UC baru = 0.714). Ilustrasi pemodelan *strengthening* ditunjukkan pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



Gambar 5 Desain Box Strengthening Member 0846-6347



Gambar 6 Desain Plate Strengthening Member 0846-6347

Desain terhadap 2 model *strengthening* untuk *member* 0846-6347 diatas dapat dipilih, kemudian dikonstruksi dan diletakkan dari ujung kiri penampang hingga ujung kanan penampang sepanjang 5.77 ft. Selain itu juga perlu ditambahkan komponen pengkaku (*stiffener*) pada kedua ujung *member* yang diberi perkuatan.

- Member 0126-0690

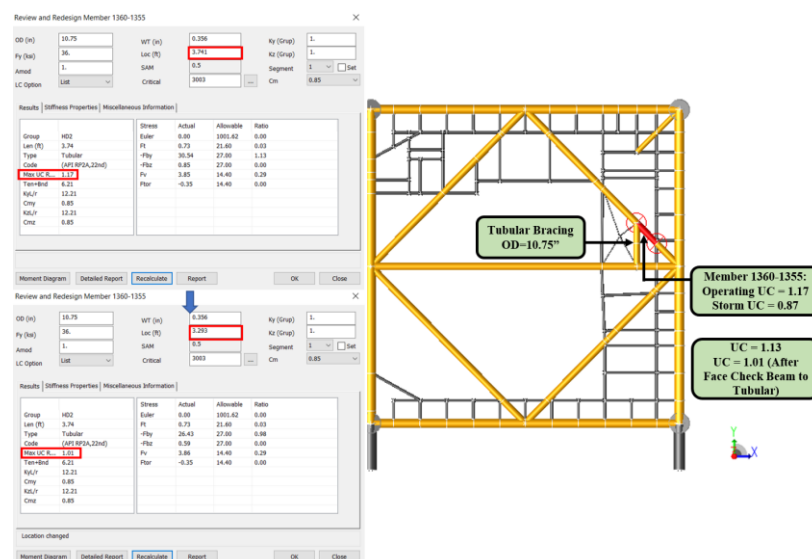
Pada kondisi aktual di lapangan, *tubular brace member* 0126-0690 ($OD=8.625$ in, $WT=0.375$ in) tidaklah dipasang hingga pada titik pusat penampang *chord* nya, melainkan hanya sampai pada sisi terluar dari *tubular member*. Oleh karena itu perlu dilakukan koreksi terhadap lokasi tegangan maksimum *tubular member*. Ilustrasi *face check* disajikan dalam **Gambar 7**.



Gambar 7 Face Check Member 0126-0690

- Member 1360-1355

Pada *tubular brace member* 1360-1355 ($OD=10.75$ in, $WT=0.356$ in) dilakukan koreksi terhadap lokasi tegangan maksimum *tubular member*. Ilustrasi *face check* disajikan dalam **Gambar 8**.



Gambar 8 Face Check Member 1360-1355

Pada analisis seismik, semua hasil pemeriksaan terhadap *punching shear*, kapasitas aksial serta defleksi untuk kondisi SLE dan DLE telah memenuhi syarat. Akan tetapi pada pemeriksaan tegangan elemen kondisi DLE terdapat komponen yang mengalami kritis. Adapun hasil pemeriksaan tegangan elemen ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3 Hasil Analisa Tegangan Member Kondisi DLE

Member	Grup	Posisi	Properti	Critical Condition	Critical Load Case	UC	Keterangan
Seismik (DLE)							
0846-6347	W12	Roof Deck Main Beam	W12x26	CM+BN	2	0.74	OK
6443-6442	W03	Roof Deck Secondary Beam	W10x22	TN+BN	1	0.48	OK
1547-0155	W02	Main Deck Primary Beam	18x50	TN+BN	1	0.637	OK
1529-1506	W07	Main Deck Secondary Beam	W8x13	CM+BN	2	1.044	OK
0127-0248	T19	Cellar Deck Primary Beam	W24x76	TN+BN	1	0.78	OK
0126-0690	RS2	Cellar Deck Riser Support	Tubular 8.625"x0.375	TN+BN	1	0.69	OK
707L-0148	DLG	Deck Leg	Tubular 30"x 1"	C>.15A	2	0.62	OK
0127-1246	V11	Deck Bracing	Tubular 12.75"x 0.375"	C>.15A	2	0.87	OK
0048-508L	FD1	Jacket Walkway	Tubular 14"x 0.375"	C>.15A	2	0.8	OK
405L-1192	FC1	Jacket El. (-) 30.00 ft	Tubular 14"x 0.356"	C>.15A	2	0.39	OK
0012-306L	FB1	Jacket El. (-) 70.00 ft	Tubular 16"x 0.362"	C>.15A	2	0.37	OK
0004-206L	FA1	Jacket El. (-) 111.00 ft	Tubular 17.924"x 0.356"	C>.15A	2	0.31	OK
104L-204L	A41	Bottom Jacket Leg	Tubular 34"x 0.478"	HYDRO	1	0.45	OK
1145-0031	EB1	Diagonal Bracing	Tubular 14"x 0.368"	C>.15A	2	0.97	OK
608L-708L	PL5	Pile Above Mudline	Tubular 30"x 1"	C>.15B	2	0.61	OK
107P	PP2	Pile Below Mudline	Tubular 30"x 1"	TN+BN	2	1.246	to be verified

Berdasarkan hasil pemeriksaan tegangan elemen, dapat dilihat bahwa *member 107P* yang merupakan *pile* yang berada dibawah *mudline* memiliki *UC* sebesar 1.246. Nilai ini melebihi syarat kekuatan yang diizinkan. Adapun *API RP 2A* sendiri menyarankan bahwa dalam mengecek kapasitas struktur, tidak hanya ditinjau dari syarat kekuatan, melainkan juga harus dilakukan pengecekan terhadap syarat daktilitas. Oleh karena itu perlu dilakukan analisis *pushover* guna memverifikasi apakah *pile* tersebut masih memiliki daktilitas yang cukup dalam menerima beban.

Berikutnya pada analisis *fatigue*, *API RP 2A* memberikan syarat khusus terhadap umur kelelahan minimum sambungan untuk anjungan lepas pantai eksisting, sebagaimana ditunjukkan pada **Pers 5**.

$$L = SF_1 L_1 + SF_2 L_2 \quad \text{Pers. 5}$$

dimana:

L_1 : Umur Operasi Tercapai Struktur (tahun)

L_2 : Umur Rencana Perpanjangan Masa Operasi (tahun)

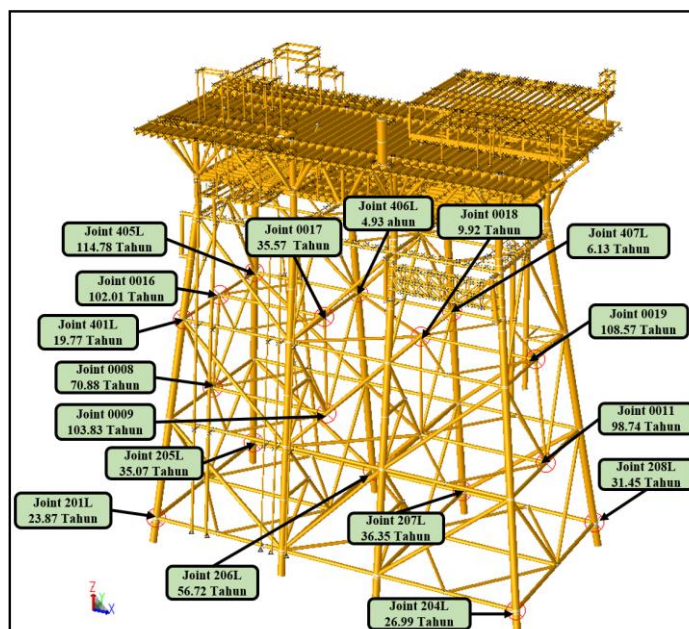
SF_1 : Faktor Keamanan, 2.0.

SF_2 : Faktor Keamanan, 2.0

Berikut ringkasan umur *fatigue platform* pada **Tabel 4** dan lokasi pada **Gambar 9**.

Tabel 4 Ringkasan Umur Fatigue Sambungan

Joint	Member	Grup	Chord Size		Tipe	Umur (tahun)	Syarat (tahun)	Catatan
			OD (in)	WT (in)				
Jacket Plan El. (-) 70 ft								
0008	0008-301L	GB1	16	0.366	TK	70.88	130	Inspeksi Lanjutan
0009	0009-302L	GB1	16	0.366	TK	103.83	130	Inspeksi Lanjutan
0011	0011-304L	GB1	16	0.366	TK	98.74	130	Inspeksi Lanjutan
Jacket Plan El. (-) 30 ft								
0016	0016-401L	GC1	14	0.356	T	102.01	130	Inspeksi Lanjutan
0017	0017-402L	GC2	16	0.356	T	35.57	130	Inspeksi Lanjutan
0018	0018-403L	GC2	16	0.356	TK	9.92	130	Inspeksi Lanjutan
0019	0019-404L	GC1	14	0.356	T	108.57	130	Inspeksi Lanjutan
Jacket Leg El. (-) 111 ft								
201L	201L-301L	A11	34	0.472	Y	23.87	130	Inspeksi Lanjutan
204L	204L-304L	A41	34	0.478	Y	26.99	130	Inspeksi Lanjutan
205L	205L-305L	B11	34	0.492	Y	35.07	130	Inspeksi Lanjutan
206L	206L-306L	B21	34	0.484	Y	56.72	130	Inspeksi Lanjutan
207L	207L-307L	B31	34	0.465	Y	36.35	130	Inspeksi Lanjutan
208L	208L-308L	B41	34	0.492	Y	31.45	130	Inspeksi Lanjutan
Jacket Leg El. (-) 30 ft								
401L	401L-0324	A13	34	0.496	K	19.77	130	Inspeksi Lanjutan
405L	405L-1111	B13	34	0.492	K	114.78	130	Inspeksi Lanjutan
406L	406L-1109	B23	34	0.488	K	4.93	130	Inspeksi Lanjutan
407L	407L-1107	B33	34	0.492	K	6.13	130	Inspeksi Lanjutan



Gambar 9 Lokasi Joint dengan Umur Kelelahan Kritis

Berdasarkan hasil analisis *fatigue*, diperoleh bahwa terdapat 17 buah *joint* yang diprediksi memiliki umur kelelahan dibawah syarat yang sebesar 130 tahun. Oleh karena itu perlu dilakukan penanganan lebih lanjut terhadap *joint-joint* kritis dengan cara melakukan inspeksi untuk mengecek kondisi aktual *joint* kemudian diperiksa seberapa besar kerusakan yang terjadi. Setelah selesai diinspeksi, dapat dilakukan perbaikan material sesuai dengan *code* pekerjaan integritas yang berlaku (misalnya *API RP 2SIM*, *AWS*, *dll*). Adapun beberapa metode perbaikan material untuk sambungan yang mengalami *fatigue* diantaranya dapat berupa:

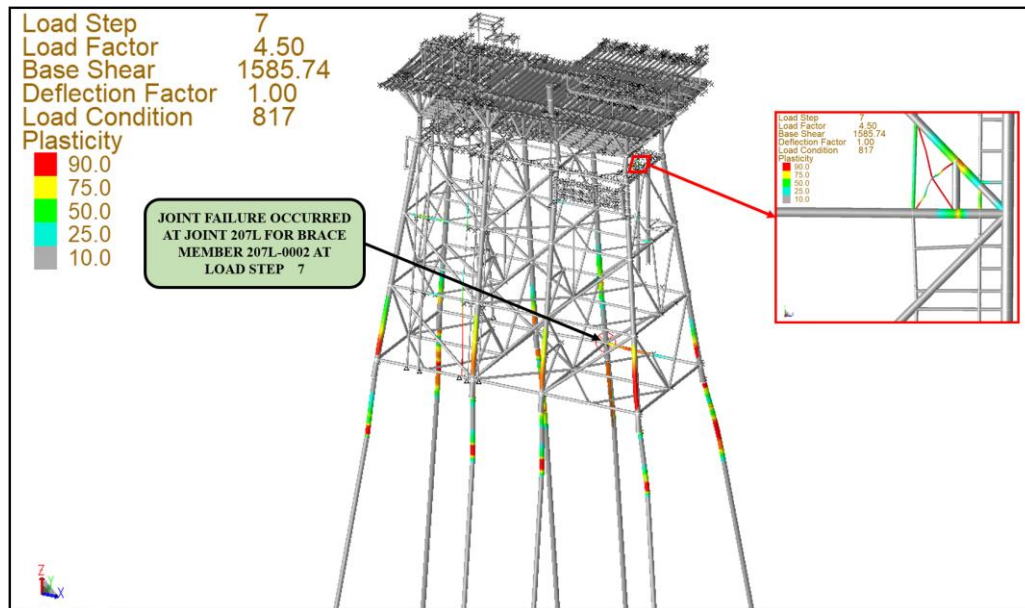
- Burr Grinding
- Water Jet Eroding
- Tungsten Inert Gas Dressing
- Shot Peening
- Hammer Peening

Pada analisis *pushover*, beban akan ditingkatkan secara bertahap dengan mekanisme peningkatan sesuai **Pers 6**.

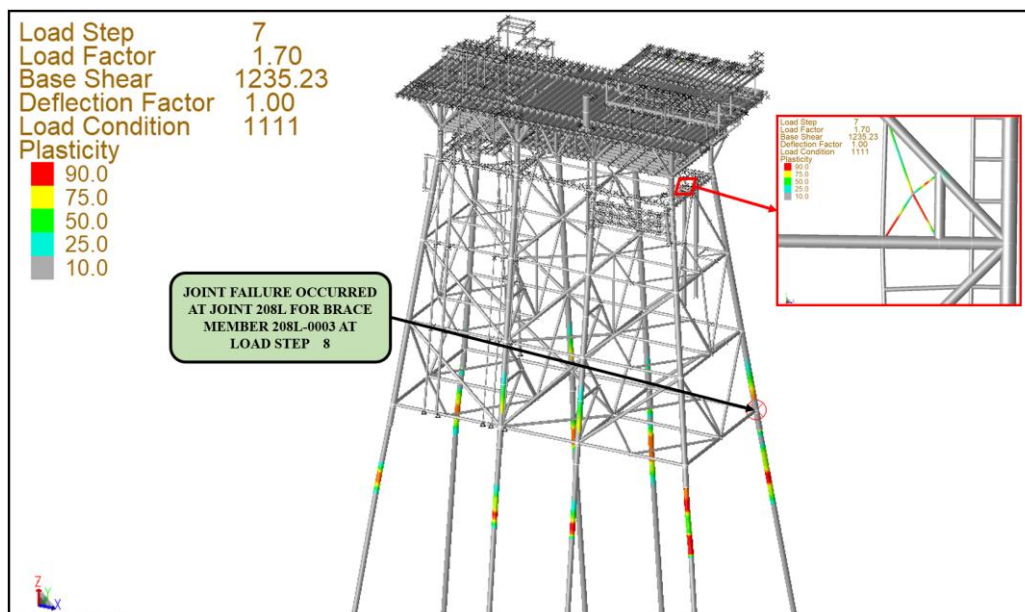
$$\text{Load Increment} = \frac{(\text{End factor} - \text{Begin factor})}{\text{Number of Increments}} \quad \text{Pers. 6}$$

Mekanisme peningkatan beban ini akan diterapkan khususnya untuk memperhitungkan perilaku plastis dari struktur. Jadi, beban gravitasi dari struktur akan diterapkan dalam satu kali peningkatan, kemudian beban dorong (*pushover*) akan diterapkan dalam beberapa kali peningkatan.

Hasil analisis *pushover* dijabarkan dalam tiga parameter yakni rasio perpindahan atau biasa dikenal daktilitas struktur, rasio cadangan kekuatan (RSR) serta permukaan kegagalan. Adapun analisis *pushover* akan selesai dilaksanakan ketika terjadi indikasi keruntuhan pada struktur. Ilustrasi indikasi keruntuhan berturut-turut untuk kondisi beban *pushover storm* dan beban *pushover DLE* dapat dilihat pada **Gambar 10** dan **Gambar 11**.

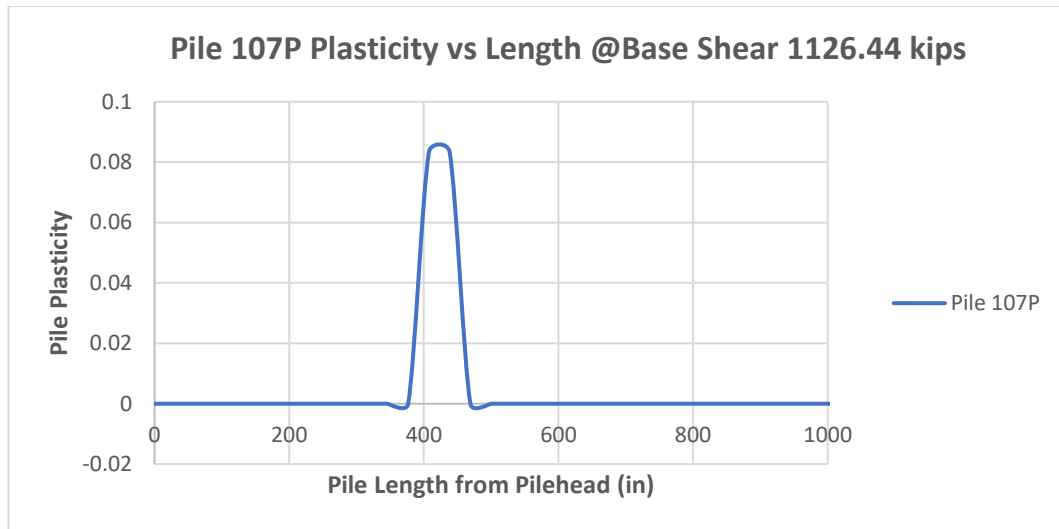


Gambar 10 Indikasi Keruntuhan Pushover Storm



Gambar 11 Indikasi Keruntuhan Pushover DLE

Dengan mengingat kembali hasil analisis tegangan elemen akibat beban seismik DLE terjadi tegangan yang melebihi batas pada *pile* 107P dimana UC yang dihasilkan adalah sebesar 1.246 saat *base shear* resultan DLE sebesar 1003 kips. Untuk itu perlu diverifikasi besarnya plastisitas yang dimiliki oleh *pile* 107P saat *base shear* tersebut. Berikut disajikan hasil verifikasi plastisitas *pile* pada **Gambar 12**.



Gambar 12 Plastisitas Pile 107P Saat Base Shear 1126.44 kips (Load Step 4)

Berdasarkan **Gambar 12** dapat dilihat bahwa bahkan pada saat *base shear* 1126.44 kips, *pile 107P* masih mengalami plastisitas maksimum sebesar 8.3%. Hal ini menunjukkan bahwa ketika terjadi gempa dengan level 1000 tahun (DLE), walaupun UC *pile 107P* melebihi batas yakni sebesar 1.246, plastisitas yang dimiliki *pile 107P* masih sangat memadai untuk menerima beban dan terus berdeformasi. Dengan begitu *pile 107P* masih memiliki daktilitas yang cukup untuk menerima beban yang lebih besar.

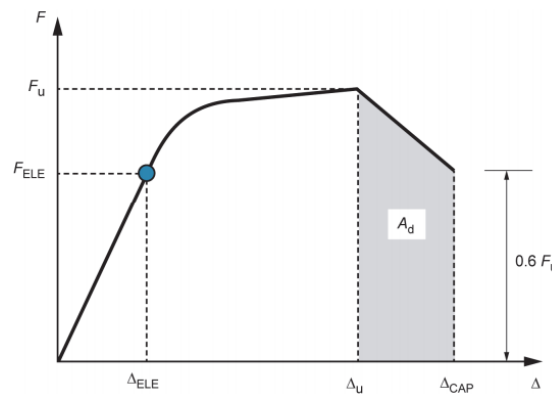
Dengan melihat semua kurva deformasi struktur akibat beban *pushover*, dapat dirangkum nilai rasio perpindahan struktur pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Ringkasan Rasio Perpindahan Struktur

Deskripsi Beban	Perpindahan Saat Yield (in)	Perpindahan Saat Runtuh (in)	Rasio Perpindahan (μ)
Pushover Storm 0	1.61	16.58	10.30
Pushover Storm 45	1.74	5.09	2.93
Pushover Storm 90	2.08	14.29	6.87
Pushover Storm 135	2	16.74	8.37
Pushover Storm 180	1.7	9.2	5.41
Pushover Storm 225	1.99	10.15	5.10
Pushover Storm 270	2.14	42.47	19.85
Pushover Storm 315	1.92	5.48	2.85
Pushover DLE	7.12	32.09	4.51

Berdasarkan **Tabel 5**, dapat dilihat bahwa rasio perpindahan terkecil yang terjadi akibat *pushover storm* adalah pada arah beban badai 315° dimana nilai μ yang dimiliki sebesar 2.85. Nilai rasio perpindahan ini cukup dapat diterima dan dijadikan sebagai peringatan ketika terjadi badai ekstrem dan struktur berdeformasi. Dengan begitu, personil dapat mempersiapkan proses evakuasi saat terjadi badai ekstrem.

Selain itu, dalam *API RP 2A 22nd Edition* subbab 5.3.6.4 halaman 46 diatur juga mengenai estimasi daktilitas akibat beban gempa sebagaimana direpresentasikan dalam suatu faktor cadangan kapasitas seismik (*seismic reserve capacity factor*) yakni C_r . Ilustrasinya dapat dilihat pada **Gambar 13**.



Gambar 13 Kurva Deformasi Beban Seismik
(Sumber: *API RP 2A WSD 22nd Edition*, halaman 209)

Adapun perhitungan faktor C_r dirumuskan pada **Pers 8.2** hingga **Pers 8.4**.

$$C_r = C_{sr} C_{dr} \quad \text{Pers. 7}$$

$$C_{sr} = \frac{\delta_U}{\delta_{ELE}} \quad \text{Pers. 8}$$

$$C_{dr} = \sqrt{1 + \frac{A_d}{F_u \delta_U}} \quad \text{Pers. 9}$$

Berdasarkan hasil perhitungan bahwa nilai C_r sebesar 3.06 yang dimiliki anjungan lepas pantai eksisting. Adapun berdasarkan *API RP 2A* estimasi C_r adalah sebesar 2.8. Oleh karena itu, anjungan lepas pantai eksisting telah memenuhi estimasi nilai daktilitas.

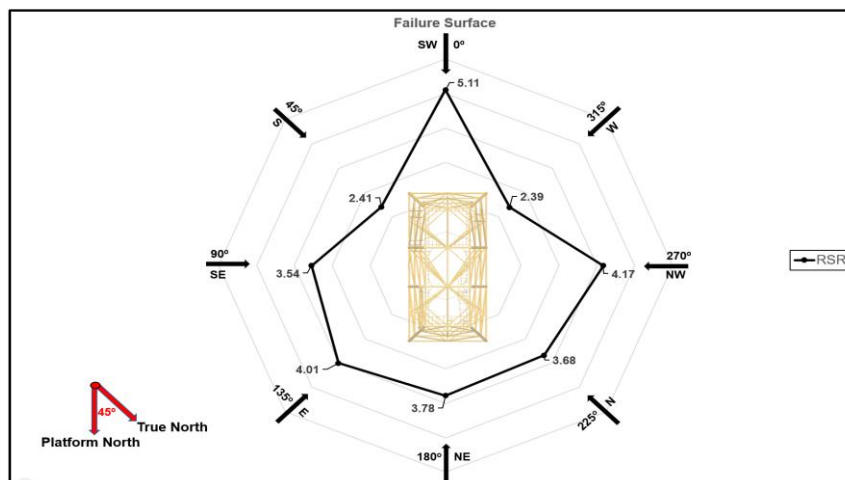
Berikutnya, hasil analisis *pushover* juga direpresentasikan dalam rangkuman RSR struktur dapat dilihat pada **Tabel 6** sebagai berikut:

Tabel 6 Rangkuman Rasio Cadangan Kekuatan Struktur

Deskripsi Beban	Base Shear Yield (kips)	Base Shear Runtuh (kips)	RSR	Syarat	Remark
Pushover Storm 0°	239.14	1221.98	5.11	1.60	OK
Pushover Storm 45°	302.11	727.33	2.41		OK
Pushover Storm 90°	393.06	1392.86	3.54		OK
Pushover Storm 135°	312.07	1251.26	4.01		OK
Pushover Storm 180°	239.55	904.65	3.78		OK
Pushover Storm 225°	307.13	1131.29	3.68		OK
Pushover Storm 270°	380.45	1585.74	4.17		OK
Pushover Storm 315°	304.83	729.75	2.39	1.00	OK
Pushover DLE	871.38	1235.23	1.42		OK

Berdasarkan **Tabel 6**, dapat dilihat bahwa struktur telah memenuhi syarat rasio cadangan kekuatan yang diinstruksikan dalam *API RP 2A*. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa struktur masih memiliki kapasitas kekuatan yang memadai dalam menerima beban yang bekerja.

Analisa *pushover* akibat kenaikan pembebanan dari 8 arah beban lingkungan dapat memberikan gambaran kapasitas *ultimate* struktur. Gambaran kapasitas ini ditunjukkan oleh rasio cadangan kekuatan struktur dari 8 arah datang beban lingkungan. Dengan mengumpulkan nilai rasio cadangan kekuatan dalam 8 arah datang beban tersebut, dapat digambarkan suatu kurva permukaan kegagalan *platform* yang mana menunjukkan ketahanan struktur akibat setiap arah datang beban. Berikut pada **Gambar 14** disajikan ilustrasi permukaan kegagalan struktur. Adapun nilai RSR yang paling kecil merepresentasikan arah keruntuhan yang paling kritis yang dapat dialami oleh struktur.



Gambar 14 Permukaan Kegagalan Struktur Akibat Pushover Storm

HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan keseluruhan hasil analisis dalam tugas akhir ini, dapat disimpulkan beberapa hal diantaranya sebagai berikut:

1. Pada analisis *inplace*, dalam hal kriteria *punching shear*, kapasitas *pile*, serta defleksi yang terjadi telah memenuhi syarat. Akan tetapi pada kriteria tegangan terdapat 4 buah *member* yang memiliki UC melebihi syarat yakni *member 1529-1506* (UC=1.56), *0846-6347* (UC=1.24), *0126-0690* (UC=1.13), *1360-1355* (UC=1.17).
2. Dengan melakukan desain *strengthening*, tegangan yang bekerja pada *member-member* kritis telah memenuhi syarat, yakni pada *member 1529-1506* (UC box=0.73; UC plate=0.754) dan *member 0846-6347* (UC box=0.579; UC plate=0.714).
3. Dengan melakukan pemeriksaan *face check*, diperoleh tegangan yang bekerja pada *member-member* kritis telah memenuhi syarat, yakni *member 0126-0690* (UC=0.60) dan *member 1360-1355* (UC=1.01).
4. Berdasarkan hasil analisis seismik dengan pembebanan gempa 200 tahunan (SLE), kriteria tegangan, *punching shear*, kapasitas *pile*, serta defleksi yang terjadi telah memenuhi syarat. Akan tetapi pada pembebanan gempa 1000 tahunan (DLE), terjadi *overstress* pada *pile 108P* dengan UC sebesar 1.82. Setelah ditindaklanjuti dengan analisis *pushover* diketahui bahwa saat *pile 108P* memiliki UC sebesar 1.82, plastisitas maksimum yang terjadi adalah sebesar 25%, sehingga dapat dikatakan *pile* masih memiliki daktilitas yang memadai untuk menerima beban.
5. Pada analisis spektral *fatigue*, diperoleh bahwa terdapat 17 buah *joint* pada *jacket* yang mana memiliki umur kelelahan dibawah syarat pertimbangan *fatigue* untuk *platform reuse* berdasarkan *API RP 2A*. Sebagai penindaklanjutan, *joint-joint* tersebut direncanakan untuk diinspeksi dan diperbaiki sesuai kriteria dan *integrity code* yang berlaku.
6. Berdasarkan hasil analisis *pushover*, diperoleh bahwa anjungan lepas pantai eksisting memiliki:
 - Kategori *platform* L-1 dimana akan dihuni oleh personil yang direncanakan dapat dievakuasi dan memiliki konsekuensi kegagalan tinggi.
 - Daktilitas yang memadai dimana rasio perpindahan terkecil yakni 2.85 terjadi saat keruntuhan akibat beban badai 315°.

- Rasio cadangan kekuatan yang memenuhi syarat *API RP 2A*, dimana RSR terendah untuk *pushover storm* adalah sebesar 2.39 pada beban arah 315°, sedangkan RSR untuk DLE adalah sebesar 1.42.
 - Permukaan kegagalan kritis yang terjadi pada arah beban desain 315°. Adapun berdasarkan data gelombang, pada arah 315° ini kejadian gelombang tidaklah signifikan. Sehingga dapat dikatakan bahwa *platform* masih aman terhadap semua moda keruntuhan yang mungkin terjadi.
7. Berdasarkan keseluruhan analisis yang telah dilakukan, anjungan lepas pantai eksisting dapat digunakan kembali untuk perpanjangan masa operasi selama 20 tahun, dengan catatan bahwa perlu dilakukan konstruksi terhadap *strengthening* yang telah didesain, serta perlu dilakukan inspeksi dan perbaikan terhadap semua sambungan yang mengalami kritis.

Adapun keseluruhan hasil analisis dalam tugas akhir ini, saran yang dapat disampaikan meliputi beberapa hal diantaranya sebagai berikut:

1. Sebaiknya, selain pemeriksaan retak pada sambungan, perlu juga dilakukan pemeriksaan terhadap beberapa komponen lainnya diantaranya:
 - Pemeriksaan ketebalan komponen kaki *jacket*, pengkaku *jacket* dll disepanjang zona terpercik.
 - Pemeriksaan sistem pelindung korosi terhadap kemungkinan kerusakan, tekuk, kelebihan muatan, dll.
 - Pemeriksaan terhadap *flooded member* jika terdapat kebocoran pada elemen pengkaku (*bracing*).
 - Pemeriksaan terhadap penggerusan dasar laut (*seabed scouring*) serta penurunan dasar laut (*settlement*).
2. Sebaiknya dilakukan pemindahan terhadap komponen peralatan yang sudah tidak terpakai.
3. Sebaiknya dilakukan pembersihan terhadap *marine growth* disepanjang *jacket leg*.
4. Pada studi rekualifikasi selanjutnya sebaiknya dilakukan analisis lokal terhadap sambungan yang mengalami kritis.

DAFTAR PUSTAKA

1. Institute, A. P (2014). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design 22nd Edition*. Washington, D C: API Publishing Services.
2. American Institute of Steel Construction, I (2005). *Steel Construction Manual* 14th Ed. United States of America: American Institute of Steel Construction, Inc.
3. AISC (2016). *Spesification for Structural Steel Buildings*, ANSI/AISC 360-16, United States of America: American Institute of Steel Construction, Inc
4. SNI 03-1729, (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
5. El-Reedy, M. A. (2015). *Marine Structural Design Calculations*. Oxford: Elsevier.
6. Reddy, D.V and Swamidas A. S. J, (2013). *Essentials of Offshore Structures Framed and-Gravity Platforms*. CRC Press.
7. Committee, S. S (1997). *Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques*.
8. P.J. Haagenzen and S.J. Maddox, (1995). *Specifications for Weld Toe Improvement by Burr Grinding, TIG Dressing and Hammer Peening for Transverse Welds*, IIW Commission XIII - Working Group 2, Collaborative Test Program on Improvement Techniques.
9. BS 7608 (1993). *Code of Practice for Fatigue Design and Assessment of Steel Structures*, British Standards Institute.
10. I.D. Harris, (1994). *Abrasive Water Jet Cutting and its Applications at TWI (UK)*, *Welding in the world*, Vol. 33, No. 4, 1994, pp 277-286.
11. Djatmiko, Eko Budi. (2006). “Analisa Kelelahan Struktur Bangunan Laut”. Modul Perkuliahan. Departemen Teknik Kelautan ITS. ITS Surabaya. (Modul Kuliah).
12. Tawekal, R. L. (2017). *Diktat Kuliah KL-4120 Anjungan Lepas Pantai*. Bandung: Penerbit ITB.