



ANALISIS KEANDALAN STRUKTUR PLATFORM EMPAT KAKI DI LAPANGAN *OFFSHORE* X MENGGUNAKAN *STRUCTURAL ANALYSIS COMPUTER SYSTEM*

**Muhammad Aulia Prathista¹, Muhammad Rasyid Ridho², Diyah Rosiani^{1*}, Arya Dwi
Candra¹**

¹Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Cepu, Blora, 58312

²Jr. *Flow Assurance Engineer*, PHE OSES, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, 12950

* E-mail: diyahrosiani@gmail.com

ABSTRAK

Industri migas lepas pantai menghadapi tantangan besar dalam memastikan keamanan dan keandalan struktur anjungan yang beroperasi di lingkungan laut yang dinamis dan ekstrem. Kegagalan struktur akibat beban lingkungan yang berlebihan dapat menimbulkan risiko tinggi terhadap keselamatan personel, kerugian ekonomi, serta dampak lingkungan yang signifikan. Untuk menjamin keselamatan operasi dan umur layanan fasilitas produksi migas di laut, analisis keandalan struktur anjungan lepas pantai sangat penting. Menggunakan *Structural Analysis Computer System (SACS)*, penelitian ini mengevaluasi kehandalan struktur monopod berkaki empat yang beroperasi di lapangan X. Pemodelan dilakukan menggunakan standar *American Petroleum Institute Recommended Practice 2A Working Stress Design (API RP2A WSD)* dan memperhitungkan beban gelombang, arus, dan angin. *Analysis Inplace* mengevaluasi respons struktur terhadap variasi beban ekstrem menggunakan dua kondisi utama: kondisi operasi dan kondisi badai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap bagian struktur memenuhi batas rasio tegangan yang diizinkan. Faktor keamanan tiang memiliki nilai lebih dari 2,0 dalam kondisi operasi dan lebih dari 2,3 dalam kondisi badai. Nilai *unity check* maksimum dalam kondisi operasi tidak melebihi 1,0 dan dalam kondisi badai tidak melebihi 1,3. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur *monopod* berkaki empat di lapangan X memiliki tingkat keandalan tinggi dan dapat beroperasi dengan aman di berbagai kondisi lingkungan.

Kata kunci: *Monopod 4-Leg, Production Platform, Unity Check, Safety Factor*

ABSTRACT

The offshore oil and gas industry faces major challenges in ensuring the safety and reliability of platform structures operating in dynamic and extreme marine environments. Structural failure due to excessive environmental loads can pose a high risk to personnel safety, economic losses, and significant environmental impacts. To guarantee the operational safety and service life of offshore oil and gas production facilities, the reliability analysis of offshore platform structures is essential. Using the *Structural Analysis Computer System (SACS)*, this study evaluates the reliability of a four-legged monopod structure operating in field X. Modeling was performed using the *API RP2A WSD* standard and took into account wave, current, and wind loads. *Analysis Inplace* evaluates the structural response to extreme load variations using two main conditions: operating conditions and storm conditions. Simulation results show that each part of the structure meets the allowable stress ratio limits. The pile safety factor has a value of more than 2.0 under operating conditions and more than 2.3 under storm conditions. The maximum *unity check* value in operating conditions does not exceed 1.0, and in storm conditions does not exceed 1.3. These results indicate that the four-legged monopod structure at field X has a high level of reliability and can operate safely in various environmental conditions.

Keywords: *Monopod 4-Leg, Production Platform, Unity Check, Safety Factor*

1. PENDAHULUAN

Untuk kegiatan eksplorasi dan produksi migas di wilayah lepas pantai, struktur anjungan yang memiliki tingkat keandalan tinggi diperlukan untuk menjamin keselamatan operasi dan keberlanjutan produksi. Kegiatan eksploitasi migas di laut membutuhkan fasilitas lepas pantai yang mampu menahan beban dinamis dari gelombang, arus laut, dan angin secara bersamaan. Untuk memastikan integritas dan stabilitas *platform* terhadap beban lingkungan ekstrem, analisis struktur yang akurat dan menyeluruh menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya kompleksitas operasi lepas pantai [1].

Salah satu lokasi strategis untuk produksi migas adalah lapangan lepas pantai X. Sebagian besar fasilitas produksinya menggunakan struktur anjungan tipe *monopod* berkaki empat, yang dimaksudkan untuk perairan dangkal dan memiliki efisiensi material yang tinggi dan mudah dibangun[2]. Namun, untuk memastikan bahwa struktur tetap memenuhi standar keselamatan yang berlaku, keandalan struktur harus dievaluasi secara berkala seiring dengan bertambahnya usia operasinya dan perubahan lingkungan laut.

Analisis struktur anjungan lepas pantai membutuhkan perangkat lunak teknik yang dapat mensimulasikan respons struktur terhadap berbagai kombinasi beban lingkungan. *Structural Analysis Computer System* (SACS) adalah salah satu perangkat lunak yang paling banyak digunakan di industri migas. *Structural Analysis Computer System* dibuat untuk melakukan analisis statik dan dinamik, analisis di tempat, dan evaluasi kekuatan sambungan dan elemen struktural sesuai dengan standar internasional seperti API RP2A WSD dan ISO 19902 [3],[4]. Kemampuan *Structural Analysis Computer System* memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis keandalan struktur, termasuk perhitungan tegangan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis kehandalan struktur *monopod* berkaki empat pada lapangan X lepas

pantai dengan menggunakan *Structural Analysis Computer System* versi 16. Berdasarkan standar API RP2A WSD, penelitian ini berfokus pada pengujian *Unity Check* dan *Safety Factor* struktur terhadap beban kombinasi lingkungan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran tentang bagaimana struktur *monopod* berfungsi dalam kondisi ekstrim di lapangan. Diharapkan juga dapat membantu proses pengambilan keputusan, perawatan, dan inspeksi pabrik di luar Indonesia.

2. METODE

API RP 2A WSD adalah metode untuk menilai apakah struktur anjungan mampu menahan beban lingkungan. Beban angin, gelombang, dan arus dihitung lalu dimasukkan ke dalam *inplace analysis*. Hasil tegangan dibandingkan dengan batas ijin. Struktur aman jika tegangan masih di bawah batas.

A. Beban Lingkungan

Untuk pemodelan struktural, penelitian ini memilih *Structural Analysis Computer System* karena dapat menganalisis berbagai parameter yang mempengaruhi struktur lepas pantai. Dalam melakukan analisis beban lingkungan, hal-hal berikut dipertimbangkan:

1. Angin

Model distribusi angin *omnidirectional* disesuaikan dengan lokasi dan kondisi lepas pantai Lapangan X untuk menghitung beban angin. Selain itu, perhitungan dilakukan untuk menghitung tekanan lateral pada setiap komponen struktur. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung beban angin:

$$u(z, t) = U(z) [1 - 0.41xI_u(z)x \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)] \quad (1)$$

$$U(z) = U_0 x [1 + Cx \ln\left(\frac{z}{32.8}\right)] \quad (2)$$

$$C = 5I_u(z) = 0.06x [1 + 0.0131xU_0] x \left(\frac{z}{32.8}\right)^{-0.22} \quad (3)$$

$$C = 5.73 \times 10^{-2} x (1 + 0.0457 x U_0)^{0.5} \quad (4)$$

$$F = \left(\frac{\rho}{2}\right) U^2(z, t) C_s A \quad (5)$$

Persamaan menjelaskan perhitungan profil angin dan gaya angin pada struktur. Persamaan (1) memberi kecepatan angin sesaat $u(z, t)$ di ketinggian z dengan mempertimbangkan fluktuasi waktu. Persamaan (2) memberi kecepatan angin rata-rata $U(z)$ yang meningkat seiring bertambah tinggi dari permukaan. Persamaan (3) dan (4) menentukan koefisien drag C yang dipengaruhi kecepatan dan karakter aliran. Persamaan (5) menghitung gaya angin F yang bekerja pada elemen dengan memakai tekanan dinamis, luas bidang dan nilai koefisien drag. Kelima persamaan ini digunakan dalam penentuan beban angin untuk analisis struktur.

2. Gelombang

Skema pembebanan gelombang digambarkan dengan parameter tinggi dan periode gelombang yang mencerminkan badai dan kondisi operasional. Persamaan berikut untuk menghitung beban gelombang:

$$F_c = 0,5 \rho C_d D u^2 \quad (6)$$

$$F_i = \rho C_m A (du/dt) \quad (7)$$

$$F = F_c + F_i \quad (8)$$

Persamaan Morison terdiri dari tiga bentuk utama. Persamaan (6) adalah memberi gaya drag akibat dorongan aliran air ke elemen. Nilai ini bergantung densitas air laut, koefisien hambat, diameter elemen dan kuadrat kecepatan partikel air. Persamaan (7) adalah memberi gaya inersia akibat percepatan massa air di sekitar elemen. Nilai ini ditentukan oleh densitas air, koefisien massa tambah, luas penampang dan percepatan partikel air. Persamaan (8) adalah memberi gaya total gelombang.

3. Arus

Untuk memodelkan pengaruh arus dan menghitung beban lateral yang diterima oleh struktur, *Structural Analysis Computer System* menerima input variabel kecepatan arus

laut pada berbagai kedalaman[4], Persamaan berikut untuk menghitung beban arus:

$$F_a = 0,5 \rho C_d D u a^2 \quad (9)$$

B. Analisis Struktur

Perangkat lunak ini menggunakan *analysis inplace* untuk menghitung parameter seperti *check unity* pada anggota dan sambungan, kapasitas tumpuan, dan defleksi struktur pada kondisi operasi dan kondisi ekstrem (badai). Perhitungan ketahanan struktur ini dapat dioptimalkan dengan *Structural Analysis Computer System* untuk memastikan keamanan dan stabilitas platform dalam kondisi *offshore* yang tidak menentu.

1. In-Place Analysis

Kapasitas tanah, defleksi, dan pemeriksaan member keselarasan dihasilkan oleh analisis tempat. Untuk menghitung tingkat kesatuan anggota, persamaan berikut dapat digunakan[5]:

$$UC = \frac{f_a}{f_c} + \frac{C_m \sqrt{f_b x^2 + f_b y^2}}{\left(1 - \frac{f_a}{\frac{\pi^2 E I}{(KL)^2}} F_b\right)} \quad (10)$$

$$UC = \frac{f_a}{0.6 F_y} + \frac{\sqrt{f_b x^2 + f_b y^2}}{F_b} \quad (11)$$

Rumus yang diberikan digunakan untuk menghitung tingkat kesatuan anggota dalam analisis tempat, yang bertujuan mengevaluasi kapasitas struktural elemen untuk menahan beban. Rumus pertama (10) lebih kompleks, mempertimbangkan berbagai faktor seperti kapasitas tanah atau kekuatan material (f_a dan f_c), gaya lentur pada arah x dan y ($f_b x$ dan $f_b y$), serta koreksi momen lentur (C_m), dengan memasukkan pengaruh panjang anggota (L), modulus elastisitas material (E), dan gaya geser (F_b) untuk hasil yang lebih akurat. Sementara itu, rumus kedua (11) lebih sederhana dan mengandalkan perbandingan antara gaya dan tegangan leleh material (F_y), serta gaya lentur yang dihitung dari kedua arah. Kedua rumus ini digunakan untuk me-

mastikan bahwa anggota struktur dapat menahan beban yang diberikan tanpa mengalami kegagalan, meskipun rumus pertama memberikan hasil yang lebih mendalam dan rinci dalam analisis kapasitas struktural.

Untuk menghitung pengecekan kesatuan, persamaan berikut digunakan jika nilai f_a/F_a member kurang dari 0.15[6]:

$$UC = \frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \quad (8)$$

Dengan menggunakan analisis pengecekan kesetaraan satu tumpukan, nilai pengecekan kesetaraan dapat dihitung dengan persamaan berikut[6]:

$$UC = \frac{\frac{P}{A}}{F_{xc}} + \frac{2}{\pi} \left| \sin^{-1} \frac{\frac{M}{Z}}{F_{xc}} \right| \quad (9)$$

Persamaan berikut dapat digunakan untuk melakukan perhitungan uji kesetaraan gabungan[6]:

$$Strength UC = \frac{F_{yb} \gamma \tau \sin \theta}{F_{yb} \left(11 + \frac{1.5}{\beta} \right)} \leq 1.0 \quad (10)$$

Tujuan dari pengujian kapasitas tiang pancang ini adalah untuk mengetahui apakah kapasitas sebenarnya dari tiang pancang melebihi kapasitas yang diizinkan. Berdasarkan kondisi yang terjadi, API RP-2A WSD membutuhkan minimal faktor keamanan ini. Tabel 1 menunjukkan batas nilai faktor keamanan [7].

Tabel 1. Safety Factor Maksimum

Kondisi	Safety Factor
Operating	2
Strom	2.33

Dalam SNI 03-1729-2000, defleksi izin untuk elemen non-struktural seperti plafon

atau partisi ringan biasanya dibatasi sekitar $L/250$, di mana L adalah panjang bentang elemen tersebut. Sementara itu, untuk elemen struktural seperti balok atau pelat utama, defleksi izin dapat dibatasi antara $L/300$ hingga $L/500$, tergantung pada jenis beban yang diterima dan fungsi dari elemen tersebut. Batas defleksi ini bertujuan untuk memastikan kenyamanan dan kestabilan bangunan dengan menghindari deformasi yang berlebihan. dan rumusnya adalah sebagai berikut:

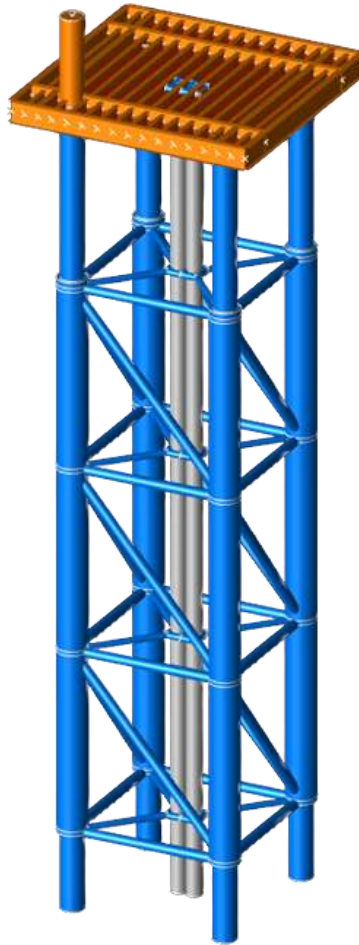
$$\delta_{\text{vertikal}} = \frac{L}{100} \quad (11)$$

$$\delta_{\text{horizontal}} = \frac{H}{200} \quad (12)$$

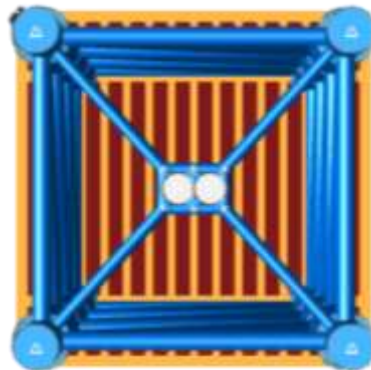
$$\delta_{\text{pilehead}} = \frac{OD}{10} \quad (13)$$

3. PEMODELAN

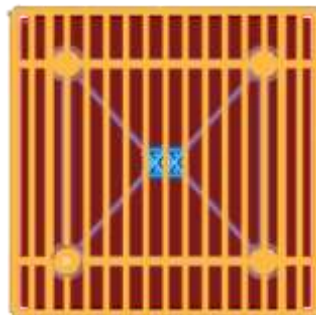
Gambar 1 hingga Gambar 4 menunjukkan model struktur monopod 4 kaki yang berfungsi sebagai anjungan lepas pantai tipe *jacket* untuk menopang fasilitas produksi di perairan dangkal. Struktur ini terdiri atas empat kaki utama yang dihubungkan oleh elemen *bracing* diagonal dan horizontal guna memberikan kekakuan serta kestabilan terhadap beban gelombang, angin, dan arus laut. Pada Gambar 1 diperlihatkan tampilan isometrik monopod secara keseluruhan dengan *deck platform* di bagian atas sebagai tempat peralatan produksi dan *crane*, serta pipa konduktor di bagian tengah sebagai saluran sumur bor. Gambar 2 menunjukkan tampak bawah yang menggambarkan susunan kaki dan pola *bracing* simetris, sedangkan Gambar 3 memperlihatkan tampak samping dengan konfigurasi vertikal dan diagonal dari dasar laut hingga ke *deck*. Adapun Gambar 4 menampilkan tampak atas yang memperlihatkan tata letak lantai *deck* dan posisi sambungan kaki struktur.



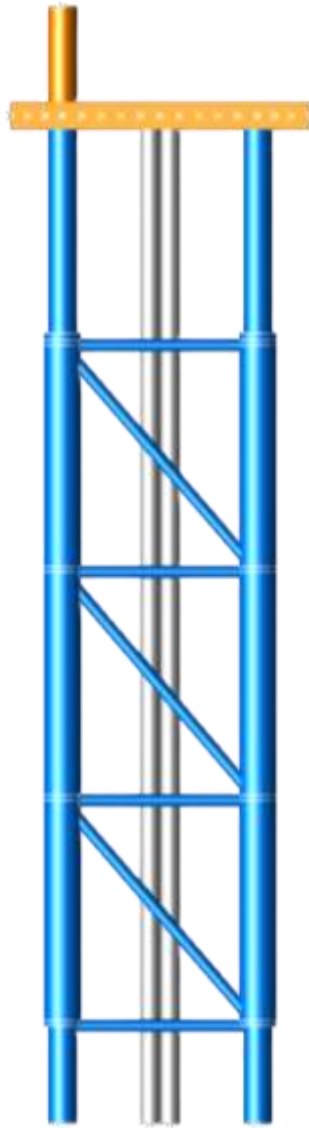
Gambar 1. Model *Monopod* 4 Kaki Isometric



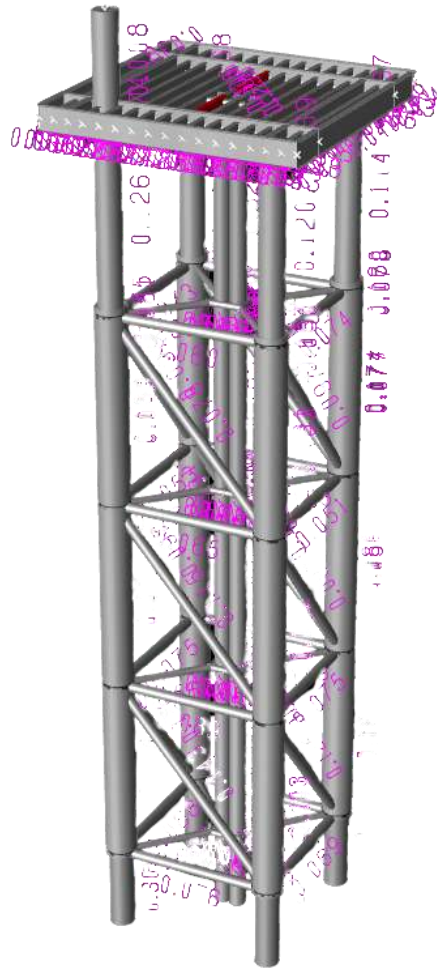
Gambar 2. Model Tampak Bawah *Monopod* 4 Kaki



Gambar 3. Model Tampak Atas *Monopod* 4 Kaki



Gambar 4. Model Tampak Samping *Monopod* 4 Kaki



Gambar 5. Model Stress yang bekerja Monopod 4 Kaki

Tabel 2 adalah data model struktur yang akan dipakai. Struktur ini dirancang dengan *Mean Sea Level* berapa di 25 m dengan elevasi *jacket* di 68.8 ft, 45.9 ft, 22.8 ft, 0 ft, dan -9.84 ft, untuk menunjang mobilitas di atas *rig* ditambahkan juga *crane* yang berada di elevasi 103 ft. Data lingkungan pada Tabel

3 akan ditambahkan pada beban lingkungan untuk mendukung *analysis inplace* dengan *wind speed* saat kondisi operasi 51.02 fps dan pada saat kondisi badai 117.85 fps, dan *significant wave* pada saat kondisi operating adalah 6.17 ft dan pada saat kondisi badai berada di 16.11 ft.

Tabel 2. Data Model Struktur Monopod 4 Kaki

Deskripsi	Nilai
<i>MSL</i>	25 m
Jumlah Kaki	4 Tiang
Jumlah Konduktor	2 Conductor
<i>Jacket Elevation</i>	EL. (+) 68.8 ft
	EL. (+) 45.9 ft
	EL. (+) 22.8 ft
	EL. (+) 0 ft
	EL. (-) 9.84 ft

<i>Deck Elevation</i>	EL. (+) 92 ft
<i>Crane Leg</i>	EL. (+) 103 ft

Tabel 3. Data Lingkungan Lapangan X

<i>Metaocean Parameter</i>	<i>1 Year Operating</i>	<i>100 Year Storm</i>
<i>Wind Speed</i>	51.02 fps	117.85 fps
<i>Maximum Individual Wave</i>	11.35 ft	29.67 ft
<i>Significant Wave</i>	6.17 ft	16.11 ft
<i>HHWL</i>	2.17 ft	
<i>MSL</i>	0.00 ft	
<i>LLWL</i>	-2.17 ft	
<i>Storm Surge</i>	0.15 ft	0.78 ft
<i>Total Tide</i>	4.49 ft	5.12 ft

Group member pada Tabel 4 yang digunakan pada *rig* ini terdiri dari elemen struktur tipe *tubular* dan *wide flange* dengan ukuran yang telah ditetapkan sejak tahap awal perancangan. Pemilihan ukuran tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan kesesuaian dan kelayakannya terhadap kebutuhan desain *rig* ini. Parameter tinggi gelombang maksimum dan periode gelombang dengan arah

yang tidak terarah dimasukkan ke dalam data gelombang dalam *analysis inplace*. Faktor kinetik gelombang yang digunakan adalah satu dengan asumsi bahwa kondisi yang digunakan adalah gempa tropis. Hanya parameter kecepatan *omnidirectional* yang digunakan untuk data angin dan arus di sini [8]. Hasil optimasi dari profil anggota ini memenuhi kriteria yang diizinkan.

Tabel 4. Member Group

No	Member Group	Deskripsi	Jenis	Ukuran (in)
1	MGM	<i>Main Girder Main Deck</i>	<i>Wide Flange</i>	W33X130
2	SGM	<i>Secondary Girder Main Deck</i>	<i>Wide Flange</i>	W24X68
3	DLH	<i>Crane Leg</i>	Tubular	35X0.875
4	CON	Konduktor	Tubular	24X0.625
5	CSU	Penyangga Konduktor	Tubular	10X 0.25
6	P1A	<i>Elevation Pile</i>	Tubular	35X 0.625
7	P1B	<i>Elevation Pile</i>	Tubular	35X 0.625
8	P2A	<i>Elevation Pile</i>	Tubular	35X 0.625
9	P2B	<i>Elevation Pile</i>	Tubular	35X 0.625
10	L1A	<i>Elevation Leg</i>	Tubular	45X0.875
11	L1B	<i>Elevation Leg</i>	Tubular	45X0.875
12	L2A	<i>Elevation Leg</i>	Tubular	45X0.875
13	L2B	<i>Elevation Leg</i>	Tubular	45X0.875
14	BR1	Penyangga Horizontal	Tubular	15X0.625
15	BR2	Penyangga Horizontal	Tubular	15X0.625
16	BR3	Penyangga Horizontal	Tubular	15X0.625
17	BR4	Penyangga Horizontal	Tubular	15X0.625
18	DB1	Penyangga Diagonal	Tubular	15X0.625
19	DB2	Penyangga Diagonal	Tubular	15X0.625
20	DBA	Penyangga Diagonal	Tubular	15X0.625

21	DBB	Penyangga Diagonal	Tubular	15X0.625
22	WB	Wishbone	Tubular	45X0.875

A. Hasil Analysis Inplace (Unity Check)

Unity check digunakan sebagai parameter evaluasi untuk menilai kelayakan elemen struktur terhadap kombinasi beban yang bekerja, dengan membandingkan nilai respons aktual terhadap kapasitas atau batas yang diijinkan. Nilai *unity check* yang lebih kecil atau sama dengan satu menunjukkan bahwa elemen struktur masih berada dalam kondisi aman dan memenuhi kriteria desain [9]. Un-

tuk menghasilkan *Unity Check* (UC) = 1.04, maka digunakan rumus $UC = \frac{F_{\text{aktual}}}{F_{\text{izinkan}}}$. Misalnya, jika kapasitas maksimum yang diijinkan F_{izinkan} adalah 5000 N, maka gaya yang diterima elemen F_{aktual} dihitung sebagai $1.04 \times 5000 = 5200$ N. Jadi, dengan gaya 5200 N, nilai UC yang dihasilkan adalah 1.04, menunjukkan bahwa gaya yang diterima sedikit melebihi kapasitas yang diizinkan.

Tabel 5. Unity Check Maksimum Member Struktur Monopod

No	Member Group	Kondisi	Unity Check
1	MGM	CB06	0.26
2	SGM	CB01	1.04
3	DLH	CO03	0.01
4	CON	CB05	0.33
5	CSU	CB05	0.31
6	P1A	CB05	0.31
7	P1B	CB05	0.30
8	P2A	CB01	0.31
9	P2B	CB01	0.31
10	L1A	CB06	0.08
11	L1B	CB04	0.08
12	L2A	CB08	0.08
13	L2B	CB02	0.08
14	BR1	CB07	0.07
15	BR2	CB01	0.07
16	BR3	CB05	0.09
17	BR4	CB05	0.08
18	DB1	CB03	0.13
19	DB2	CB03	0.12
20	DBA	CB01	0.14
21	DBB	CB01	0.14

B. Defleksi

Defleksi merupakan respons deformasi yang terjadi pada struktur akibat pengaruh beban eksternal, seperti gelombang, arus, dan angin, yang menyebabkan terjadinya perpindahan dari posisi keseimbangan awal. Analisis defleksi pada struktur lepas pantai sangat penting untuk memastikan bahwa deformasi yang terjadi masih berada dalam batas tole-

ransi yang diizinkan sehingga tidak mempengaruhi integritas maupun fungsi struktur secara keseluruhan [10].

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur *platform* yang dirancang sesuai dengan standar API RP2A WSD memiliki ketahanan terhadap kondisi operasional dan badai. Nilai pengecekan kesatuan yang dihasilkan berada di bawah batas toleransi industri, yang me-

nunjukkan bahwa desain ini layak untuk digunakan di lapangan *offshore*. Untuk menghasilkan defleksi sebesar 0.490 meter, kita dapat menggunakan rumus defleksi balok dengan beban terpusat di tengah: $\delta = \frac{FL^3}{48EI}$. Misalnya, dengan panjang balok $L = 5$ m, modulus elastisitas $E = 200 \times 10^9$ N/m² (untuk baja), dan momen inersia $I = 8 \times 10^{-6}$ m⁴, kita dapat menghitung gaya F yang diperlukan untuk menghasilkan defleksi 0.490 meter. Hasil perhitungannya menunjukkan bahwa gaya yang diperlukan adalah sekitar 30,105.6 N, dengan parameter yang telah ditentukan.

Berdasarkan Tabel 6 dan Tabel 7, hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh nilai defleksi arah x dan y pada struktur *monopod* 4 kaki masih berada jauh di bawah batas izin

yang ditentukan. Pada kondisi 100-Years Storm, defleksi maksimum arah x sebesar 0.529 in dan arah y sebesar 0.223 in, sedangkan pada kondisi 1-Year Operating masing-masing hanya 0.129 in dan 0.059 in. Nilai tersebut jauh lebih kecil dari batas izin 3.90 in untuk arah x dan 1.57 in untuk arah y.

Jika parameter seperti pengujian keselamatan anggota, faktor keselamatan tumpuan, dan defleksi vertikal dan horizontal memenuhi persyaratan standar, maka implementasi model ini di lapangan X dapat dilakukan. Meskipun demikian, uji lapangan lebih lanjut diperlukan untuk memastikan keandalan struktur terhadap kondisi ekstrem dan berubah-ubah. Selain itu, API RP2A WSD sebagai acuan harus diperiksa secara berkala untuk memastikan bahwa itu sesuai dengan praktik industri terbaru.

Tabel 6. Hasil Analisa Defleksi x untuk Monopod 4 Kaki

Condition	Load Combination	Def x(in)	Def Izin (in)
100-Years Storm	CB01	0.490	3.90
	CB02	0.338	3.90
	CB03	-0.025	3.90
	CB04	-0.384	3.90
	CB05	-0.529	3.90
	CB06	-0.377	3.90
	CB07	-0.017	3.90
	CB08	0.351	3.90
1-Year Operating	CO01	0.129	3.90
	CO02	0.092	3.90
	CO03	-0.020	3.90
	CO04	-0.114	3.90
	CO05	-0.152	3.90
	CO06	-0.112	3.90
	CO07	-0.017	3.90
	CO08	0.094	3.90

Tabel 7. Hasil Analisa Defleksi y untuk Monopod 4 Kaki

Condition	Load Combination	Def y(in)	Def Izin (in)
100-Years Storm	CB01	-0.015	1.57
	CB02	0.157	1.57
	CB03	0.223	1.57
	CB04	0.164	1.57
	CB05	0.014	1.57
	CB06	-0.157	1.57
	CB07	-0.225	1.57

	CB08	-0.164	1.57
1-Year Operating	CO01	-0.006	1.57
	CO02	0.042	1.57
	CO03	0.059	1.57
	CO04	0.044	1.57
	CO05	0.006	1.57
	CO06	-0.042	1.57
	CO07	-0.060	1.57
	CO08	-0.044	1.57

4. SIMPULAN

Struktur anjungan dinyatakan memenuhi seluruh kriteria desain yang ditetapkan berdasarkan hasil pemeriksaan *analysis inplace*, dengan uraian sebagai berikut:

1. Pada kondisi operasi normal, nilai *unity check ratio* seluruh elemen struktur berada di bawah 1, menunjukkan bahwa tegangan yang terjadi masih berada dalam batas aman. Pada kondisi badai, nilai *unity check* tetap berada di bawah 1, meskipun pada elemen *secondary main girder* nilai tersebut mendekati 1. Namun demikian, kondisi tersebut masih tergolong aman dan menunjukkan bahwa kesinambungan serta keselarasan antar sambungan struktur dapat terjaga dengan baik dalam kurun waktu lima tahun ke depan.
2. Nilai defleksi maksimum pada arah sumbu-X terjadi pada kondisi badai CB01 dengan nilai sebesar 0.490. Nilai ini masih jauh di bawah batas toleransi yang dapat menimbulkan pergeseran lateral signifikan terhadap struktur, sehingga kestabilan lateral tetap terjaga.
3. Nilai defleksi maksimum pada arah sumbu-Y terjadi pada kondisi badai CB03 dengan nilai sebesar 0.233. Nilai tersebut juga masih berada jauh di bawah ambang batas yang dapat menyebabkan pergerakan vertikal berlebihan, baik ke arah atas maupun ke bawah, sehingga integritas vertikal struktur tetap terjaga.

Studi ini membuktikan bahwa *jacket platform* berkaki empat yang dirancang untuk

lapangan X telah memenuhi persyaratan desain yang ditetapkan dalam API RP 2A-WSD, khususnya terkait aspek ketahanan struktural terhadap beban operasi maupun beban lingkungan ekstrem. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan serta defleksi maksimum pada kondisi operasi dan kondisi badai masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan. Hal ini mengindikasikan bahwa rancangan struktur tersebut layak untuk diimplementasikan di lapangan dengan tingkat keselamatan yang memadai. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan desain *platform*, sekaligus memberikan kontribusi terhadap upaya peningkatan efisiensi dan keandalan fasilitas produksi migas di wilayah *offshore*.

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan terhadap struktur *rig*, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk meningkatkan keandalan dan ketepatan desain. Pertama, disarankan untuk memperbesar ukuran profil *wide flange* pada bagian *secondary main girder* agar nilai *unity check* tidak mencapai angka satu, sehingga struktur memiliki faktor keamanan yang lebih optimal. Kedua, perlu dilakukan penambahan beban dengan data yang lebih akurat agar hasil analisis *inplace* dapat merepresentasikan kondisi aktual di lapangan secara lebih tepat. Selain itu, disarankan pula untuk memperbesar ukuran atau ketebalan pelat pada elemen-elemen tertentu guna menghindari potensi *collapse* atau kegagalan lokal akibat beban berlebih yang mungkin terjadi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. L. Tawekal, *Bangunan Lepas Pantai*, Institut Teknologi Bandung.
 - [2] E. B. Djatmiko, *Fatigue Analysis on Ocean Structure* (PowerPoint), ITS, Teknik Kelautan, Surabaya, 2012.
 - [3] D. S. W., R. Ibrahim, and M. Utami, *Laporan Perancangan Struktur Lepas Pantai Dinamis*, ITS, Jurusan Teknik Kelautan, Surabaya, 2016.
 - [4] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platform Working Stress Design*, API RP2A WSD 21st edition, American Petroleum Institute, Dec. 2000.
 - [5] American Institute of Steel Construction Inc., *AISC Steel Construction Manual*, 2005.
 - [6] International Organization for Standardization, *ISO 19902: Petroleum and Natural Gas Industries - Fixed Steel Offshore Structures 1st Edition*, Switzerland, 2007.
 - [7] S. K. Chakrabarti, *Handbook of Offshore Engineering*, Elsevier, 2005.
 - [8] B. C. Gerwick, *Construction of Marine and Offshore Structures*, CRC Press, 2007.
 - [9] Y. Goda, *Random Seas and Design of Maritime Structures*, World Scientific, 2010.
 - [10] D. V. Reddy and A. S. J. Swamidass, *Essentials of Offshore Structures: Framed and Gravity Platforms*, CRC Press, 2014.
- θ = Sudut brace
 $\delta_{vertikal}$ = Defleksi vertical
 $\delta_{horizontal}$ = Defleksi Horizontal
 $\delta_{pilehead}$ = Defleksi pilehead
 L = Jarak lateral antara acting joint dengan joint acuan
 OD = Diameter luar tiang pancang
 H = Jarak dalam arah vertical antrara - acting joint dengan joint acuan

Daftar Simbol

F = Gaya angin (kips)
 ρ = Massa jenis angin (0.0023668 slugs/ft³ untuk tekanan dan temperatur standar)
 u = Kecepatan angin (ft/s)
 C_s = Koefisien bentuk
 A = Luas permukaan objek (ft²)
 f_a = Axial loading (kips)
 F_a = Allowable axial stress (ksi)
 C_m = Reduction factor
 f_{bx} = X axis bending moment (kips-ft)
 f_{by} = Y axis bending moment (kips-ft)
 K = effective length factor
 E = Elastic modulus (ksi)
 I = Moment of Inertia (ft⁴)
 F_b = Allowable bending stress (ksi)
 F_y = Yeild Strength (ksi)
 F_{xc} = Inelastic local buckling stress (ksi)
 P = Non-linear analysis axial loading
 A = Cross-sectional area (ft²)
 M = Non-linear bending moment (kips-ft)
 Z = Plastic sectional modulus (ft³)
 f_a = Yield strength pada joint chord
 F_a = Yield strength pada brace member
 γ = Diameter chord 2(Tebal Chord)
 τ = Tebal Chord
 β = Perbandingan diameter brace dengan chord