

Evaluasi Respons Linear Elastik Portal Tiga Dimensi Pada Sistem Kaki Struktur Jacket Terhadap Beban Vertikal Menggunakan SAP2000

Rakhmat Alghifari Arif*, Arsa Aldani Saptarina, Sitti Suhaeni Sarhani Rahman, dan Muhammad Zubair Muis Alie

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

*arifyagi19@gmail.com

Abstract

Jacket structures are three-dimensional steel framing systems that transfer top side loads to the foundation through legs, braces, and tubular joints. This study evaluates the linear-elastic response of a three-dimensional portal model representing a jacket leg system under vertical loading using SAP2000. The model consists of four legs connected by diagonal and horizontal braces, rigid joints, fixed base supports, and hollow circular sections. The analysis includes self-weight and four concentrated loads of 1 kN applied at the top. The revised study extends the original work through section-property calculations, load-path assessment, a unit-consistency audit, and a critical interpretation of the output contours. The SAP2000 displacement legends show an E-6 scale factor; assuming the model length unit is metre, the maximum U_x and U_y are 245×10^{-6} m or 0.245 mm, while U_z is 560×10^{-6} m or 0.560 mm. These values correct the initial metre-based interpretation. The reported axial response is compression-dominated, ranging from -1059.44 kN to +7.41 kN. The stress contour identifies the middle-brace region as a critical response zone; however, yielding cannot be concluded because the active stress unit was not documented. Reported torsion ranges from -4.60 to +3.42 kN·m, indicating internal coupling associated with the three-dimensional configuration. Linear static analysis is therefore useful for preliminary stiffness and load-path assessment, but unit verification, reaction equilibrium, member discretization, joint flexibility, soil-pile interaction, environmental loading, and nonlinear analysis are required before the model can support an offshore structural safety assessment.

Keywords: Finite Element Method, Jacket Structure, SAP2000, Three-Dimensional Frame, Unit Audit, Vertical Load.

PENDAHULUAN

Struktur jacket merupakan salah satu bentuk struktur tetap lepas pantai yang banyak digunakan untuk menopang fasilitas produksi, pengeboran, utilitas, dan topside pada perairan dangkal sampai menengah. Sistem ini tersusun dari leg utama, brace diagonal dan horizontal, sambungan tubular, serta pile atau fondasi yang bekerja sebagai satu kesatuan. ISO 19902 menempatkan jacket sebagai salah satu kategori struktur baja lepas pantai tetap, sedangkan API RP 2A-WSD menyediakan kerangka praktik desain dan konstruksi platform tetap. Kedua rujukan tersebut menegaskan bahwa evaluasi struktur tidak hanya mencakup kekuatan elemen, tetapi juga stabilitas global, jalur beban, sambungan, fondasi, dan kondisi lingkungan [1], [2].

Dalam operasi, struktur jacket menerima kombinasi berat sendiri, beban topside, beban hidup, gelombang, arus, angin, gempa, pengaruh instalasi, serta kondisi accidental. DNV-RP-C205 memberikan landasan untuk penetapan kondisi lingkungan dan beban lingkungan, sedangkan ISO 19902 menuntut agar pemodelan mencerminkan perilaku struktur yang relevan terhadap limit state yang dikaji. Oleh sebab itu, analisis beban vertikal murni tidak dimaksudkan sebagai desain akhir, melainkan sebagai tahap dasar untuk memeriksa kekakuan, jalur transfer beban, tanda gaya dalam, dan konsistensi model sebelum kombinasi beban yang lebih kompleks diterapkan [1], [3].

Metode elemen hingga memungkinkan struktur rangka tiga dimensi diidealisasi sebagai sekumpulan elemen frame yang terhubung pada node. Setiap elemen dapat memikul gaya aksial, gaya geser, momen lentur, dan torsi. SAP2000 menyediakan formulasi elemen frame, transformasi koordinat lokal-global, perakitan matriks kekakuan, penerapan kondisi batas, dan pascaproses hasil analisis. Meskipun antarmuka perangkat lunak memudahkan pemodelan, kualitas keluaran tetap bergantung pada konsistensi geometri, properti material, unit aktif, kondisi batas, serta interpretasi pengguna [9]–[13].

Kajian sebelumnya memperlihatkan bahwa perilaku jacket berkembang dari respons elastik awal menuju nonlinieritas geometri, plastisitas material, local joint flexibility, buckling, dan redistribusi gaya ketika beban meningkat. Abdel Raheem menunjukkan pentingnya mempertimbangkan respons nonlinier terhadap kombinasi beban struktur dan gelombang, sedangkan Othman dan Mohd menggunakan analisis kapasitas ultimit untuk menilai respons platform pada kondisi operasi dan ekstrem. Studi Wang dkk. memperlihatkan bahwa model elemen hingga

yang efisien tetap perlu memasukkan kondisi batas dan pembebanan yang realistis ketika digunakan untuk optimasi jacket [17]–[19].

Sambungan tubular merupakan bagian yang sangat penting karena geometri chord-brace menghasilkan konsentrasi tegangan dan local joint flexibility yang tidak selalu tertangkap secara memadai oleh model centerline frame sederhana. Tinjauan Zavvar dkk. merangkum peran stress concentration factor, hot-spot stress, degree of bending, dan local joint flexibility dalam penilaian sambungan tubular. Penelitian Mia dkk. juga menunjukkan bahwa perilaku sambungan XT di bawah beban statik memerlukan perhatian pada distribusi tegangan lokal, bukan hanya gaya nominal elemen [20], [21].

Naskah awal penelitian ini melaporkan perpindahan U_x dan U_y sebesar 0,245 m serta U_z sebesar 0,560 m. Namun, legenda kontur SAP2000 pada gambar keluaran memperlihatkan faktor E-6. Apabila unit panjang model adalah meter, angka 245 dan 560 pada legenda masing-masing setara dengan 245×10^{-6} m dan 560×10^{-6} m, yaitu 0,245 mm dan 0,560 mm. Koreksi skala ini penting karena kesalahan pembacaan eksponen sebesar 10^6 dapat mengubah penilaian dari deformasi sangat kecil menjadi deformasi yang tampak tidak realistis. Selain itu, satuan kontur tegangan tidak terlihat pada gambar, sehingga klaim bahwa tegangan melampaui tegangan luluh belum dapat dipastikan tanpa memeriksa active units atau tabel keluaran SAP2000.

Berdasarkan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan: (1) menyusun kembali dasar teori dan metodologi model portal tiga dimensi pada leg system jacket; (2) menghitung properti penampang untuk mendukung verifikasi model; (3) menginterpretasikan kembali perpindahan berdasarkan faktor skala pada kontur; (4) mengevaluasi distribusi gaya aksial, tegangan, dan torsi secara hati-hati; serta (5) menyusun audit kualitas model dan rekomendasi pengembangan. Kontribusi utama penelitian terletak pada integrasi antara hasil pemodelan yang tersedia dan prosedur pemeriksaan konsistensi yang dapat direplikasi untuk kegiatan pembelajaran maupun studi pendahuluan struktur offshore.

LANDASAN TEORI

Sistem Struktur dan Jalur Beban Jacket

Pada struktur jacket, beban vertikal dari topside diteruskan melalui deck legs atau titik tumpu ke leg utama. Brace mengikat leg agar rangka memiliki kekakuan lateral dan torsional, sekaligus membantu mendistribusikan gaya antarbidang. Pada kondisi simetris dengan beban vertikal yang ditempatkan tepat pada sumbu kekakuan, respons ideal didominasi gaya tekan pada leg. Dalam model tiga dimensi nyata, perbedaan geometri brace, orientasi sumbu lokal, konektivitas node, dan deformasi kompatibilitas dapat menimbulkan gaya tarik lokal, lentur, serta torsi walaupun beban eksternal tidak memiliki komponen lateral [14]–[16].

Konfigurasi brace memengaruhi panjang efektif, jalur beban, massa, serta lokasi konsentrasi respons. Optimasi jacket modern karena itu tidak hanya mengurangi massa, tetapi juga mempertahankan batas perpindahan, kekuatan, fatigue, dan kemampuan fabrikasi. Motlagh dkk. memasukkan kerusakan fatigue ke dalam optimasi platform jacket, sedangkan Zheng dkk. mengembangkan metode optimasi efisien untuk struktur jacket turbin angin lepas pantai. Hasil-hasil tersebut menguatkan bahwa dimensi dan konfigurasi brace harus dipandang sebagai variabel struktural yang memengaruhi banyak limit state [23], [27].

Formulasi Elemen Frame Tiga Dimensi

Untuk analisis statik linear, keseimbangan global struktur dinyatakan melalui persamaan matriks kekakuan. Matriks kekakuan elemen pada sistem koordinat lokal ditransformasikan ke koordinat global, kemudian dirakit berdasarkan konektivitas node. Setelah kondisi batas diterapkan, perpindahan nodal diperoleh dan digunakan untuk menghitung gaya ujung elemen serta tegangan nominal. [9]–[13].

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

dengan $[K]$ adalah matriks kekakuan global, $\{u\}$ adalah vektor perpindahan dan rotasi nodal, serta $\{F\}$ adalah vektor gaya nodal. Formulasi ini mengasumsikan hubungan gaya-perpindahan linear, deformasi kecil, material elastik linear, dan kondisi batas yang tidak berubah selama pembebanan. Apabila terjadi plastisitas, buckling, perubahan geometri besar, atau contact, analisis nonlinier diperlukan. DNV-RP-C208 memberi pedoman khusus untuk penentuan kapasitas struktur menggunakan metode elemen hingga nonlinier [4].

Properti Penampang Pipa Berongga

Elemen leg dan brace dimodelkan sebagai circular hollow section. Dengan diameter luar D dan tebal t , diameter dalam adalah $d = D - 2t$. Luas penampang, momen inersia lentur, dan konstanta torsi polar untuk penampang lingkaran berongga dihitung sebagai berikut [14].

$$A = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (2)$$

$$I = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2t)^4] \quad (3)$$

$$J = \frac{\pi}{32} [D^4 - (D - 2t)^4] = 2I \quad (4)$$

Berat garis nominal dapat dihitung dari $w = \rho g A$. Nilai A , I , J , dan w berguna untuk memeriksa apakah section property yang dimasukkan pada perangkat lunak konsisten dengan dimensi geometri. Untuk elemen tubular offshore, spesifikasi produk dan fabrikasi perlu disesuaikan dengan tujuan penggunaan. ASTM A992/A992M pada dasarnya merupakan spesifikasi baja untuk rolled structural shapes; karena model penelitian menggunakan elemen tubular, properti A992 sebaiknya diperlakukan sebagai idealisasi sifat material, bukan sebagai penetapan spesifikasi pipa offshore. API Specification 2B secara khusus membahas fabrikasi structural steel pipe untuk konstruksi struktur offshore yang dilas [7], [8].

Tegangan Nominal, Torsi, dan Indikator Pemanfaatan

Dalam elemen frame, tegangan normal nominal pada serat terluar dapat dihitung dari kombinasi gaya aksial dan momen lentur. Untuk satu bidang lentur, bentuk sederhananya adalah:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{Mc}{I} \quad (5)$$

dengan N adalah gaya aksial, M adalah momen lentur, c adalah jarak serat terluar dari sumbu netral, A adalah luas penampang, dan I adalah momen inersia. Tegangan geser akibat torsi dapat diperkirakan melalui:

$$\tau = \frac{Tr}{J} \quad (6)$$

dengan T adalah momen torsi dan r adalah radius lokasi evaluasi. Jika satuan tegangan telah dipastikan dan analisis berada dalam domain elastik, rasio pemanfaatan sederhana terhadap tegangan luluh dapat dinyatakan sebagai $UR\sigma = |\sigma|/F_y$. Akan tetapi, rasio ini bukan pengganti pemeriksaan code karena desain jacket juga memerlukan interaksi aksial-lentur, buckling lokal dan global, efek hidrostatik, sambungan tubular, faktor kondisi, serta limit state lainnya. [1], [2], [6]

Verifikasi dan Validasi Model Numerik

Verifikasi menjawab apakah persamaan dan model numerik diselesaikan dengan benar, sedangkan validasi menilai apakah model cukup merepresentasikan sistem fisik. Pada model rangka statik, verifikasi dasar mencakup pemeriksaan unit aktif, geometri, konektivitas, orientasi sumbu lokal, properti penampang, boundary condition, faktor self-weight, keseimbangan gaya reaksi, skala deformasi, serta tanda gaya. Keseimbangan vertikal dapat diperiksa dengan hubungan:

$$\Sigma R_z \approx W_{self} + \Sigma P_i \quad (7)$$

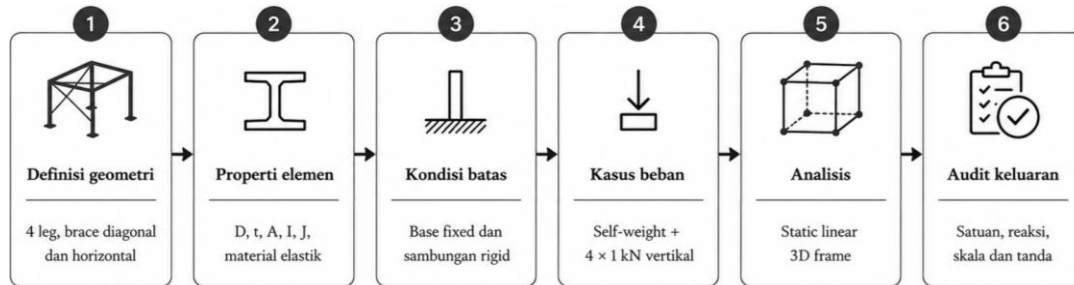
dengan ΣR_z adalah jumlah reaksi vertikal, W_{self} adalah berat sendiri model, dan ΣP_i adalah jumlah beban vertikal eksternal. Selisih yang besar dapat menunjukkan load case tidak lengkap, faktor self-weight tidak sesuai, restraint tidak benar, atau output dibaca pada kombinasi yang berbeda. Untuk penelitian lanjutan, validasi dapat dilakukan melalui model benchmark, perhitungan tangan sederhana, pengujian laboratorium, atau perbandingan dengan perangkat lunak lain. Kajian reliabilitas jacket juga menunjukkan bahwa ketidakpastian material, geometri, beban,

dan model harus dipertimbangkan ketika tujuan analisis berkembang menuju penilaian keselamatan atau fatigue [22].

METODOLOGI PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan studi numerik dengan analisis static linear pada model 3D frame. Data primer yang tersedia berupa geometri elemen, properti material, kondisi batas, skenario pembebanan, serta gambar kontur hasil SAP2000. Revisi dilakukan tanpa mengubah geometri dan angka keluaran utama, tetapi menambahkan perhitungan penampang, konversi skala displacement, audit satuan, dan pembatasan interpretasi. Alur kerja penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur pemodelan, analisis, dan audit keluaran.

Geometri Model

Model terdiri atas empat leg yang membentuk konfigurasi persegi dengan dimensi bidang yang bertambah dari bagian atas ke dasar. Leg dihubungkan oleh brace diagonal dan horizontal pada beberapa elevasi. Model centerline menggunakan sambungan rigid, sehingga translasi dan rotasi kompatibel pada node. Geometri ini merupakan idealisasi global; eccentricity sambungan, can, chord ovalization, weld profile, dan joint flexibility tidak dimodelkan secara eksplisit.

Tabel 1. Dimensi penampang elemen model.

Elemen	Diameter luar D (m)	Tebal t (m)	Diameter dalam d (m)
Leg	1,80	0,04	1,72
Top brace	0,90	0,06	0,78
Middle brace	1,20	0,06	1,08
Horizontal brace	0,90	0,03	0,84

Tabel 2. Panjang braces diagonal.

Kelompok brace diagonal	Panjang (m)
Brace 1 (teratas)	7,1410
Brace 2	8,6603
Brace 3	10,3410
Brace 4 (terbawah)	12,1244

Tabel 3. Dimensi bidang brace horizontal.

Elevasi bidang horizontal	Dimensi denah (m × m)
Level 1	4 × 4
Level 2	6 × 6
Level 3	8 × 8
Level 4	10 × 10
Base	12 × 12

Properti Material dan Penampang

Model menggunakan modulus elastisitas $E = 200$ GPa, rasio Poisson $\nu = 0,30$, densitas $\rho = 7850$ kg/m³, dan tegangan luluh acuan $F_y = 345$ MPa. Nilai tersebut konsisten dengan idealisasi baja struktural elastik. Namun, ASTM A992/A992M-22 mencakup structural steel shapes dan bukan spesifikasi khusus pipa offshore. Oleh karena itu, nama material pada model harus dipisahkan dari pemilihan produk aktual: analisis numerik dapat menggunakan nilai E dan F_y tersebut, tetapi desain fabrikasi perlu menetapkan grade tubular, toughness, weldability, corrosion allowance, dan persyaratan inspeksi yang sesuai. [7], [8]

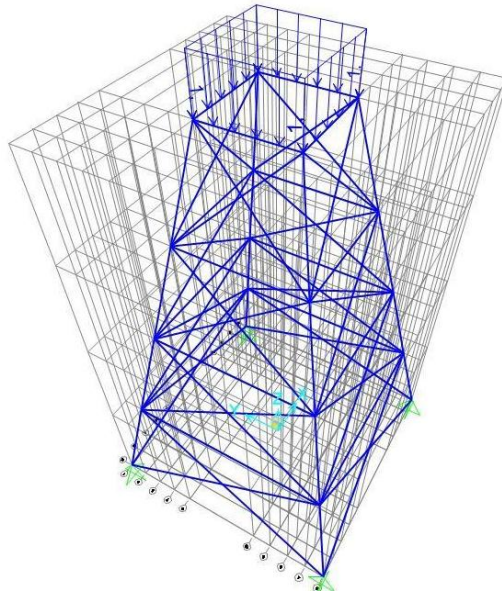
Tabel 4. Properti penampang hasil perhitungan analitik.

Elemen	A (m ²)	I (m ⁴)	J (m ⁴)	Berat garis (kN/m)
Leg	0,221168	0,085681	0,171361	17,032
Top brace	0,158336	0,014037	0,028073	12,193
Middle brace	0,214885	0,035005	0,070010	16,548
Horizontal brace	0,081996	0,007767	0,015534	6,314

Tabel 4 menunjukkan bahwa self-weight elemen tidak dapat diabaikan. Berat garis nominal leg sekitar 17,032 kN/m, middle brace 16,548 kN/m, top brace 12,193 kN/m, dan horizontal brace 6,314 kN/m. Dengan banyaknya elemen dan panjang brace yang mencapai lebih dari 12 m, total berat sendiri rangka secara logis jauh lebih besar daripada empat beban terpusat yang totalnya hanya 4 kN. Konsekuensinya, respons yang diamati kemungkinan besar didominasi oleh self-weight, sementara beban 1 kN pada setiap titik atas berfungsi sebagai perturbasi kecil. Interpretasi hasil harus menyebutkan dominasi ini secara eksplisit.

Kondisi Batas, Konektivitas, dan Pembebanan

Keempat node pada dasar leg diberi fixed support, yaitu $U_x = U_y = U_z = R_x = R_y = R_z = 0$. Seluruh pertemuan elemen diasumsikan sebagai rigid joint tanpa end release. Asumsi fixed base dapat digunakan untuk studi awal, tetapi cenderung menghasilkan kekakuan global yang lebih tinggi dibandingkan sistem pile-soil yang fleksibel.



Gambar 2. Model tiga dimensi dan pembebanan vertikal pada SAP2000.

Dalam model desain offshore, kekakuan foundation dan soil-pile interaction dapat direpresentasikan dengan pile elements, distributed soil springs, $p - \frac{\gamma}{t} - \frac{z}{q} - z$ curves, atau model fondasi ekuivalen sesuai tingkat ketelitian yang dibutuhkan [1], [2], [16]. Satu load case static linear digunakan. Faktor self-weight diaktifkan dan empat beban terpusat vertikal masing-masing 1 kN diterapkan pada node top brace, sehingga jumlah beban terpusat adalah 4 kN. Arah global sumbu harus ditetapkan secara konsisten; dalam pembahasan ini sumbu Z dianggap vertikal. Gambar 2 memperlihatkan model SAP2000 dan lokasi umum pembebanan.

Parameter Keluaran dan Prosedur Audit

Keluaran utama yang dikaji meliputi *displacement* global U_x , U_y , U_z dan resultannya, gaya aksial elemen, kontur tegangan, serta torsi. Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil analisis SAP2000 telah dibaca dengan satuan, faktor eksponen, dan konvensi tanda yang benar. Selain itu, lokasi respons maksimum diperiksa terhadap jalur beban dan perubahan kekakuan struktur. Audit juga mencakup pemeriksaan keseimbangan reaksi, orientasi sumbu lokal, diskretisasi model, dan kewajaran fisik hasil. Nilai *displacement*, gaya, tegangan, dan torsi dibandingkan dengan skala geometri serta estimasi sederhana untuk mendeteksi kemungkinan kesalahan pemodelan atau interpretasi keluaran.

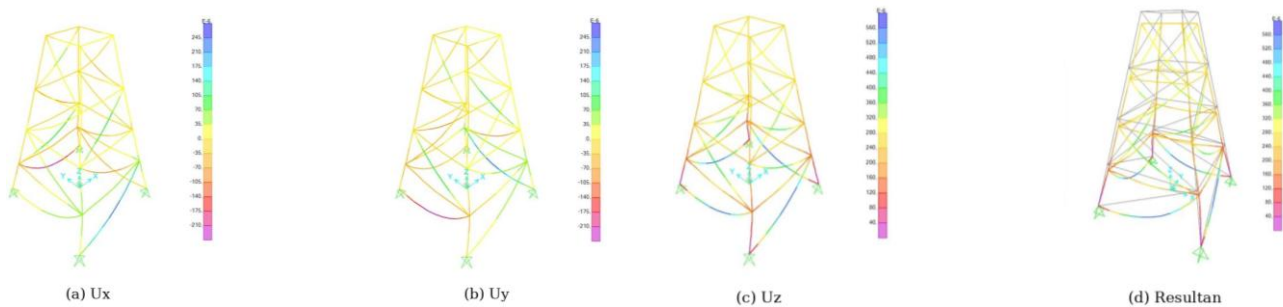
Tabel 5. Checklist verifikasi keluaran model

Pemeriksaan	Tujuan	Bukti yang diperlukan
Unit aktif	Mencegah kesalahan konversi satuan	Status unit SAP2000 atau <i>header output</i>
Faktor eksponen	Memastikan pembacaan nilai kontur	Notasi E-3, E-6, dan sejenisnya
Keseimbangan reaksi	Memastikan beban dan <i>restraint</i> bekerja	<i>Joint reactions</i> dan <i>total applied load</i>
Orientasi sumbu lokal	Memastikan interpretasi P, V2, V3, T, M2, M3	<i>Local axes</i> dan <i>sign convention</i>
Diskretisasi	Memastikan distribusi respons tertangkap	Jumlah elemen dan <i>output station</i>
Kewajaran fisik	Mendeteksi hasil yang tidak realistis	<i>Hand check</i> dan perbandingan skala geometri

HASIL DAN PEMBAHASAN

Respons Perpindahan Global

Kontur pada Gambar 3 menampilkan nilai maksimum 245 untuk U_x , 245 untuk U_y , dan 560 untuk U_z , dengan multiplier E-6 pada legenda. Jika unit panjang aktif adalah meter, konversinya adalah $U_{x,max} = U_{y,max} = 245 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,245 \text{ mm}$ dan $U_{z,max} = 560 \times 10^{-6} \text{ m} = 0,560 \text{ mm}$. Dengan demikian, nilai 0,245 m dan 0,560 m pada interpretasi awal harus dikoreksi menjadi milimeter. Koreksi ini didukung langsung oleh notasi skala pada gambar dan menghasilkan orde deformasi yang jauh lebih wajar untuk rangka tubular besar di bawah self-weight dan beban tambahan 4 kN.



Gambar 3. Kontur perpindahan global: (a) U_x , (b) U_y , (c) U_z , dan (d) resultan.

Tabel 6. Konversi nilai displacement berdasarkan multiplier pada kontur.

Komponen	Angka legenda	Multiplier	Nilai dalam meter	Nilai praktis
U_x maksimum	245	E-6	$245 \times 10^{-6} \text{ m}$	0,245 mm
U_y maksimum	245	E-6	$245 \times 10^{-6} \text{ m}$	0,245 mm
U_z maksimum	560	E-6	$560 \times 10^{-6} \text{ m}$	0,560 mm

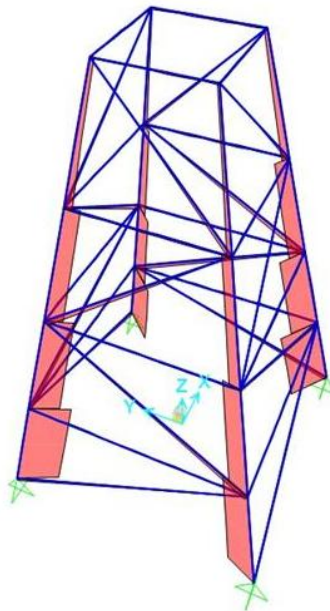
Perpindahan vertikal sekitar 2,29 kali perpindahan lateral, sedangkan rasio $\frac{U_x}{U_z}$ dan $\frac{U_y}{U_z}$ adalah 0,4375. Kesamaan U_x dan U_y menunjukkan respons global yang relatif seimbang pada dua arah horizontal atau penggunaan geometri yang secara umum simetris. Meskipun demikian, perpindahan lateral nonnol di bawah pembebanan vertikal dapat

muncul karena perubahan bidang brace, coupling antara translasi dan rotasi, eksentrisitas node, atau orientasi elemen dalam model tiga dimensi. Nilai lateral ini tidak langsung membuktikan ketidaksimetrian geometrik; pemeriksaan node coordinates dan joint loads diperlukan untuk menentukan penyebabnya.

Dari sudut pandang kewajaran fisik, pembacaan 0,560 m akan setara dengan 560 mm dan sangat besar dibandingkan beban terpusat 4 kN. Sebaliknya, 0,560 mm sesuai dengan orde deformasi elastik yang mungkin terjadi pada sistem dengan luas leg sekitar 0,221 m² dan modulus elastisitas 200 GPa. Hand check deformasi aksial tunggal $\delta = \frac{PL}{AE}$ dapat digunakan sebagai pembanding orde besaran, walaupun distribusi gaya aktual pada rangka lebih kompleks. Pemeriksaan semacam ini merupakan cara efektif mendeteksi kesalahan unit sebelum kesimpulan teknis ditulis.

Distribusi Gaya Aksial dan Jalur Beban

Hasil yang dilaporkan menunjukkan gaya aksial ekstrem sebesar -1059,44 kN pada kondisi tekan dan +7,41 kN pada kondisi tarik. Dengan konvensi tanda yang digunakan pada naskah awal, respons bersifat compression dominated. Rasio magnitudo tekan terhadap tarik sekitar 143, sehingga leg atau elemen tertentu menerima gaya tekan yang jauh lebih besar daripada gaya tarik maksimum. Pola ini konsisten dengan fungsi leg sebagai jalur utama beban gravitasi, sedangkan brace menstabilkan geometri dan mendistribusikan gaya antarleg [15], [16].



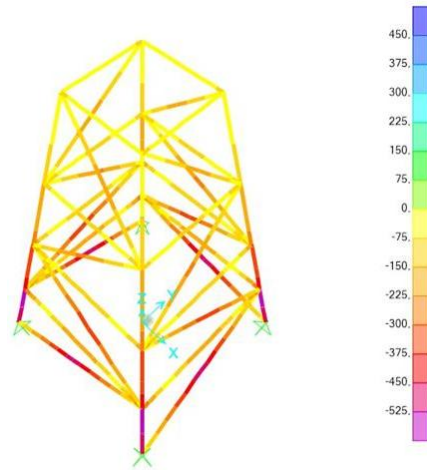
Gambar 4. Distribusi gaya aksial pada elemen frame.

Namun, besarnya gaya tekan tidak boleh diatribusikan hanya kepada empat beban 1 kN. Perhitungan berat garis menunjukkan bahwa satu leg saja memiliki berat sekitar 17,032 kN untuk setiap meter panjang. Total self-weight seluruh leg dan brace dapat dengan mudah mencapai ratusan hingga lebih dari seribu kilonewton, bergantung pada jumlah dan panjang elemen. Oleh karena itu, gaya tekan sekitar 1059 kN secara kualitatif lebih masuk akal sebagai hasil akumulasi self-weight dan kompatibilitas rangka daripada sebagai respons terhadap 4 kN beban terpusat. Penelitian selanjutnya harus melaporkan total model weight dan base reactions agar kontribusi masing-masing beban dapat dipisahkan.

Untuk elemen tekan tubular, evaluasi tidak berhenti pada tegangan N/A. Panjang efektif, slenderness, local buckling, global buckling, interaksi aksial-lentur, dan kondisi ujung perlu diperiksa dengan ketentuan code yang sesuai. Model centerline dengan rigid joints dapat mengubah distribusi momen dan panjang efektif dibandingkan sambungan aktual. Analisis kapasitas yang lebih maju dapat menggunakan pushover atau nonlinier material-geometri untuk mengidentifikasi urutan plastifikasi, buckling, redistribusi gaya, dan reserve strength ratio. Pendekatan tersebut telah digunakan dalam studi platform ageing maupun penilaian kekuatan ultimit jacket. [18], [24]

Evaluasi Kontur Tegangan dan Konsistensi Satuan

Kontur tegangan melaporkan nilai maksimum +620,75 dan minimum -1018,05, dengan lokasi respons tinggi pada brace dan sambungan tingkat tengah. Secara mekanis, lokasi tersebut dapat dipengaruhi oleh perubahan dimensi brace, perubahan kekakuan antarlevel, gaya aksial, dan momen sekunder. Akan tetapi, gambar tidak menampilkan unit tegangan. SAP2000 mengikuti active units; apabila model menggunakan kN-m, tegangan dapat ditampilkan dalam kN/m², sedangkan apabila unit disetel N-mm, keluaran dapat dinyatakan dalam N/mm² atau MPa. Karena unit aktif tidak didokumentasikan, angka tidak boleh langsung diberi satuan MPa.



Gambar 5. Kontur tegangan hasil model frame SAP2000.

Tabel 7. Dampak kemungkinan satuan terhadap interpretasi tegangan.

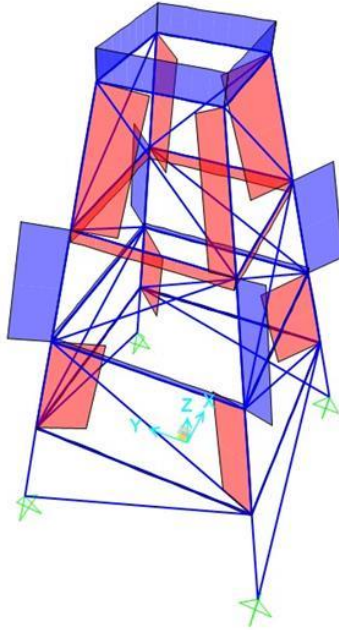
Skenario unit	Interpretasi +620,75	Interpretasi - 1018,05	Implikasi terhadap $F_y = 345$ MPa
Angka benar-benar MPa	620,75 MPa	-1018,05 MPa	UR $\approx 1,80$ dan 2,95; analisis elastik melampaui domain luluh
Angka kN/m ²	0,62075 MPa	-1,01805 MPa	UR $\approx 0,0018$ dan 0,0030; jauh di bawah luluh

Tabel 7 menunjukkan bahwa ketidakjelasan unit menghasilkan perbedaan 1000 kali pada tegangan dan mengubah kesimpulan keselamatan secara total. Jika satuannya memang MPa, maka nilai ekstrem melampaui $F_y = 345$ MPa dan analisis static linear tidak lagi konsisten untuk menilai respons pascaluluh; diperlukan analisis material nonlinear, pemeriksaan model, dan verifikasi apakah tegangan yang diplot merupakan axial stress, combined stress, atau output lain. Sebaliknya, jika satuannya kN/m², nilai tegangan aktual hanya sekitar 0,62 sampai 1,02 MPa dan tidak mendekati luluh. Karena itu, kesimpulan yang dapat dipertahankan dari gambar ini hanya bahwa area brace tengah merupakan zona respons relatif tinggi, bukan bahwa elemen pasti gagal.

Lebih lanjut, model frame memberikan tegangan nominal berdasarkan resultan gaya elemen. Model tersebut tidak menangkap distribusi tegangan lokal pada dinding chord, weld toe, punching shear, atau ovalization sambungan tubular. Penilaian fatigue dan hot-spot stress membutuhkan model lokal shell atau formulasi stress concentration factor yang sesuai. DNV-RP-C203 menempatkan hot-spot stress dan detail sambungan sebagai aspek penting fatigue assessment, sementara penelitian sambungan tubular menekankan pengaruh local joint flexibility dan degree of bending. [5], [20], [28]

Respons Torsi

Respons torsi dilaporkan memiliki maksimum +3,42 kN·m dan minimum -4,60 kN·m, sehingga rentang ekstremnya 8,02 kN·m. Walaupun beban eksternal diarahkan vertikal, torsi lokal dapat terbentuk akibat orientasi sumbu lokal elemen, kompatibilitas rotasi pada rigid joint, arah brace yang tidak berimpit dengan pusat geser sistem, serta kopling momen pada frame tiga dimensi. Torsi tidak selalu menunjukkan instabilitas global, tetapi dapat menjadi indikator bahwa sambungan dan brace menerima aksi gabungan.



Gambar 6. Distribusi momen torsi pada elemen struktur.

Interpretasi torsi perlu disertai display local axes dan diagram T pada station elemen. Tanda positif dan negatif mengikuti orientasi sumbu lokal 1, sehingga dua elemen dengan orientasi berlawanan dapat menunjukkan tanda berbeda untuk aksi fisik yang serupa. Untuk pipa bundar, kekakuan torsi elastik berbanding lurus dengan GJ/L ; karena J pada leg lebih besar daripada brace, brace yang lebih kecil dapat menunjukkan rotasi atau tegangan geser yang relatif lebih sensitif. Meski demikian, besarnya torsi masih perlu dibandingkan dengan momen lentur dan gaya aksial agar signifikansinya terhadap utilisasi dapat dinilai.

Zona Kritis dan Implikasi Pemodelan Sambungan

Berdasarkan kontur yang tersedia, zona respons relatif tinggi berada pada pertemuan brace tingkat tengah, perubahan konfigurasi antarlevel, dan area dekat dasar. Zona tersebut logis karena jalur gaya dari bidang atas berkumpul dan didistribusikan kembali menuju leg serta tumpuan. Namun, istilah “zona kritis” dalam penelitian ini berarti lokasi prioritas untuk pemeriksaan lebih lanjut, bukan lokasi kegagalan yang telah terbukti. Penetapan kegagalan memerlukan nilai unit yang benar, demand-capacity ratio, local joint checks, dan limit state yang jelas.

Pemodelan rigid joint cenderung menganggap sambungan lebih kaku daripada sambungan tubular aktual. Pada sambungan nyata, deformasi chord face dan local flexibility dapat mengubah distribusi momen serta natural frequency. Untuk analisis global pendahuluan, asumsi rigid dapat diterima dengan catatan. Untuk evaluasi tegangan sambungan, model shell lokal, joint flexibility factor, atau stress concentration factor perlu digunakan. Review sambungan tubular terbaru menekankan bahwa integrasi global dan lokal lebih mampu menggambarkan interaksi antara respons platform dan hotspot sambungan. [20]

Perbandingan dengan Kajian Terdahulu

Hasil penelitian ini tidak dapat dibandingkan langsung secara numerik dengan platform lain karena geometri, kedalaman air, load cases, dan kondisi fondasi berbeda. Namun, pola kualitatifnya sejalan dengan literatur: leg menyalurkan beban gravitasi terutama dalam tekan; brace membatasi deformasi relatif dan mendistribusikan gaya; sambungan tubular menjadi area konsentrasi respons; dan model linear hanya menggambarkan kondisi elastik awal. Studi nonlinier menunjukkan bahwa ketika beban ditingkatkan, plastisitas dan buckling mengubah jalur beban yang tidak tertangkap oleh analisis linear. [17], [18]

Pada desain dan optimasi jacket untuk turbin angin, parameter geometri dan penampang dievaluasi bersama kondisi beban realistis, soil-pile interaction, dan kriteria dinamik. Häfele dkk. mengembangkan pendekatan pengembangan desain jacket dengan memperhatikan integrasi proses desain, sementara Wang dkk. dan Zheng dkk. menunjukkan manfaat pemodelan parametrik untuk efisiensi optimasi. Dibandingkan pendekatan tersebut, model penelitian ini lebih sederhana dan sesuai sebagai model edukatif atau verifikasi awal, bukan sebagai representasi lengkap platform di lokasi tertentu. [19], [26], [27]



Penelitian Indonesia juga menunjukkan arah pengembangan yang relevan. Setiawan dkk. menggunakan pushover untuk platform ageing di perairan dangkal dan merumuskan strategi mitigasi bagi perpanjangan umur, sedangkan Sumardi dan Rosyid mengkaji optimasi desain untuk menekan biaya konstruksi. Kedua topik tersebut memperlihatkan bahwa model global yang terverifikasi dapat dikembangkan menuju penilaian kapasitas, life extension, dan optimasi ekonomi. Tahap pertama yang wajib dipenuhi tetap sama, yaitu konsistensi unit, geometri, beban, kondisi batas, dan interpretasi output. [24], [25]

Audit Kualitas Model

Audit menunjukkan bahwa model telah memiliki komponen dasar analisis frame, tetapi dokumentasi output belum cukup untuk penilaian keselamatan. Kekurangan paling penting adalah unit aktif, total reaction, identitas elemen kritis, dan definisi jenis stress contour. Keempat informasi tersebut sebenarnya dapat diekspor langsung dari SAP2000 dan perlu menjadi lampiran standar pada penelitian numerik. Dengan dokumentasi yang baik, pembaca dapat menelusuri hasil, melakukan replikasi, dan membedakan antara temuan model dan asumsi interpretatif.

Tabel 8. Ringkasan audit kualitas model dan kebutuhan perbaikan.

Aspek	Status berdasarkan data tersedia	Tindakan yang disarankan
Geometri global	Dimensi utama leg dan brace tersedia	Lampirkan koordinat node dan elevasi lengkap
Properti penampang	D dan t tersedia; A, I, J dapat diverifikasi	Ekspor section properties dari SAP2000 dan bandingkan dengan Tabel 4
Material	E, ν , ρ , dan F_y tersedia	Gunakan spesifikasi tubular offshore yang sesuai untuk desain aktual
Kondisi batas	Fixed base dan rigid joint disebutkan	Lakukan sensitivitas foundation stiffness dan joint flexibility
Pembebanan	Self-weight dan 4×1 kN tersedia	Laporkan total weight, load pattern, dan load combination
Displacement	Multiplier E-6 terlihat	Nyatakan U dalam mm dan sertakan active units
Gaya aksial/torsi	Nilai ekstrem tersedia	Ekspor tabel beserta nama elemen, station, dan unit
Tegangan	Kontur tersedia, unit tidak terlihat	Jangan simpulkan yielding sebelum unit dan jenis stress terverifikasi
Keseimbangan reaksi	Belum tersedia	Lampirkan ΣR dan bandingkan dengan total load
Validasi	Belum tersedia	Bandingkan dengan hand calculation atau benchmark model

ANALISIS SENSITIVITAS DAN PENGEMBANGAN MODEL

Sensitivitas terhadap Boundary Condition

Asumsi fixed support menghasilkan enam derajat kebebasan tertahan pada setiap node dasar. Pada struktur aktual, pile dan tanah memberikan kekakuan translasi serta rotasi yang terbatas dan bergantung pada kedalaman, jenis tanah, diameter pile, serta tingkat pembebanan. Studi sensitivitas dapat dilakukan dengan tiga model: fixed base, spring support ekuivalen, dan pile-soil model terdistribusi. Perbandingan U_x , U_y , U_z , base shear, overturning moment, dan gaya aksial leg akan menunjukkan seberapa besar asumsi tumpuan memengaruhi hasil global.

Sensitivitas terhadap Kekakuan Sambungan

Rigid joint dapat dibandingkan dengan model semi-rigid menggunakan rotational spring atau joint flexibility factor. Variasi kekakuan sambungan, misalnya 100%, 75%, 50%, dan 25% dari kondisi rigid ideal, dapat digunakan untuk memetakan perubahan displacement dan momen ujung. Apabila respons berubah signifikan, model sambungan lokal perlu dikembangkan. Untuk area fatigue, shell submodel dapat digunakan untuk memperoleh hot-spot stress pada weld toe sesuai pendekatan yang relevan [5], [20].



Sensitivitas terhadap Beban dan Self-Weight

Untuk memisahkan pengaruh self-weight dan beban titik, disarankan sekurang-kurangnya tiga load case: SW-ONLY, POINT-ONLY, dan SW+POINT. Karena analisis linear memenuhi prinsip superposisi, hasil kombinasi seharusnya sama dengan penjumlahan dua load case pertama dalam batas toleransi numerik. Perbandingan ini dapat menunjukkan kontribusi 4 kN terhadap displacement dan gaya internal. Jika perbedaannya sangat kecil, skala beban titik perlu disesuaikan dengan tujuan penelitian atau dijelaskan sebagai load perturbation.

Analisis Nonlinier dan Kapasitas

Apabila tujuan berkembang dari pemahaman respons awal menjadi penilaian kapasitas, analisis harus memasukkan $P-\Delta/P-\delta$, material plasticity, initial imperfection, member buckling, dan joint behavior. DNV-RP-C208 dapat digunakan sebagai rujukan penetapan resistance melalui nonlinear FE, sedangkan pushover dapat memberikan kurva base shear-displacement, urutan terbentuknya plastic hinge, mekanisme keruntuhan, dan reserve strength. Penelitian kekuatan ultimit jacket menunjukkan bahwa respons pada kondisi ekstrem tidak dapat diprediksi hanya dari hasil linear elastik [4], [18], [24].

Beban Lingkungan dan Fatigue

Tahap lanjut perlu menambahkan gelombang, arus, angin, marine growth, buoyancy, hydrodynamic coefficients, dan kombinasi pembebanan yang sesuai. DNV-RP-C205 menyediakan prinsip penilaian kondisi dan beban lingkungan. Untuk struktur tubular, fatigue menjadi penting karena tegangan siklik terkonsentrasi pada sambungan. DNV-RP-C203 dan studi reliabilitas jacket dapat digunakan untuk mengembangkan evaluasi S-N, hot-spot stress, cumulative damage, dan probabilistic fatigue assessment [3], [5], [22].

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang harus dinyatakan secara eksplisit. Pertama, file model SAP2000 dan tabel output mentah tidak tersedia, sehingga active units, total reaction, nama elemen kritis, station output, dan kombinasi pembebanan tidak dapat diverifikasi langsung. Kedua, geometri lengkap berupa elevasi node, tinggi total, dan detail konektivitas tidak seluruhnya terdokumentasi. Ketiga, model menggunakan fixed base dan rigid joint tanpa soil-pile interaction maupun local joint flexibility. Keempat, analisis bersifat static linear dan tidak mencakup buckling, plastisitas, geometric nonlinearity, dynamic response, atau fatigue. Kelima, beban lingkungan dan topside yang representatif belum diterapkan. Keenam, penggunaan nama material ASTM A992 pada elemen tubular merupakan idealisasi properti dan belum merupakan spesifikasi produk offshore.

Keterbatasan tersebut tidak menghilangkan nilai model sebagai studi dasar. Sebaliknya, model dapat digunakan untuk mengajarkan hubungan antara geometri, kekakuan, self-weight, dan distribusi gaya dalam, sekaligus menekankan pentingnya audit unit. Namun, hasil tidak boleh digunakan untuk menyatakan struktur aman, tidak aman, atau layak dibangun tanpa pemodelan dan pemeriksaan code yang lebih lengkap.

KESIMPULAN

Model struktur tiga dimensi berupa frame empat leg dengan brace diagonal dan horizontal dapat merepresentasikan jalur beban gravitasi pada tahap awal analisis. Respons aksial elemen menunjukkan dominasi gaya tekan, dengan nilai ekstrem sebesar $-1059,44$ kN pada kondisi tekan dan $+7,41$ kN pada kondisi tarik. Pada keluaran displacement, legenda kontur menggunakan multiplier E-6 sehingga, dengan asumsi unit panjang model adalah meter, perpindahan maksimum yang diperoleh adalah $U_x = U_y = 0,245$ mm dan $U_z = 0,560$ mm, bukan masing-masing 0,245 m dan 0,560 m. Koreksi pembacaan faktor eksponen tersebut menjadi salah satu temuan penting dalam verifikasi hasil analisis.

Berdasarkan karakteristik pembebanan, self-weight diperkirakan menjadi komponen beban yang dominan. Berat garis nominal elemen berada pada kisaran 6,314–17,032 kN/m sehingga beban terpusat sebesar 4 kN relatif kecil dibandingkan dengan berat keseluruhan struktur. Kontur tegangan menunjukkan bahwa brace pada tingkat tengah merupakan salah satu zona dengan respons relatif tinggi. Namun, karena unit tegangan tidak terlihat pada keluaran yang tersedia, nilai 620,75 dan $-1018,05$ belum dapat langsung dinyatakan dalam MPa ataupun dibandingkan dengan tegangan leleh (F_y). Oleh karena itu, active units dan jenis stress output perlu diverifikasi sebelum dilakukan evaluasi terhadap kapasitas material.



Torsi elemen berada pada rentang $-4,60$ hingga $+3,42 \text{ kN}\cdot\text{m}$. Meskipun beban eksternal yang diterapkan terutama berarah vertikal, torsi lokal tetap dapat muncul akibat kompatibilitas rotasi, orientasi sumbu lokal, serta interaksi antareleman dalam konfigurasi rangka tiga dimensi. Sebelum model digunakan sebagai dasar penilaian keselamatan struktur, diperlukan verifikasi lanjutan yang mencakup keseimbangan reaksi, sensitivitas kondisi tumpuan dan sambungan, dokumentasi satuan, identifikasi elemen dan station kritis, serta penambahan beban lingkungan dan soil–pile interaction. Analisis nonlinier dan fatigue juga perlu dipertimbangkan sesuai dengan limit state yang dievaluasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, atas dukungan akademik dan fasilitas pembelajaran analisis struktur. Revisi naskah ini disusun dengan mempertahankan data geometri dan keluaran utama pada studi awal serta menambahkan audit teknis untuk meningkatkan keterlacakan hasil.

Pernyataan Ketersediaan Data

Data yang digunakan dalam artikel ini terdiri atas dimensi elemen, properti material, kondisi batas, skenario pembebanan, dan gambar hasil SAP2000 yang terdapat pada naskah awal. File model SAP2000 dan tabel output mentah tidak disertakan; oleh sebab itu, verifikasi active units dan keseimbangan reaksi direkomendasikan sebelum publikasi final.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Organization for Standardization, Petroleum and Natural Gas Industries—Fixed Steel Offshore Structures, ISO 19902:2020, Geneva, Switzerland, 2020.
- [2] American Petroleum Institute, Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design, API RP 2A-WSD, 22nd ed., Washington, DC, USA, 2014.
- [3] DNV, Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205, Høvik, Norway, Apr. 2025, amended Mar. 2026.
- [4] DNV, Determination of Structural Capacity by Non-linear Finite Element Analysis Methods, DNV-RP-C208, Høvik, Norway, Sep. 2019, amended Oct. 2022.
- [5] DNV, Fatigue Design of Offshore Steel Structures, DNV-RP-C203, Høvik, Norway, Oct. 2024, amended Oct. 2025.
- [6] American Institute of Steel Construction, Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-22, Chicago, IL, USA, 2022.
- [7] ASTM International, Standard Specification for Structural Steel Shapes, ASTM A992/A992M-22, West Conshohocken, PA, USA, 2022, doi: 10.1520/A0992_A0992M-22.
- [8] American Petroleum Institute, Specification for the Fabrication of Structural Steel Pipe, API Spec 2B, 6th ed., Washington, DC, USA, 2021.
- [9] Computers and Structures, Inc., CSI Analysis Reference Manual, Rev. 15, Berkeley, CA, USA, 2017.
- [10] K. J. Bathe, Finite Element Procedures, 2nd ed. Watertown, MA, USA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.
- [11] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 7th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [12] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 4th ed. New York, NY, USA: Wiley, 2002.
- [13] W. McGuire, R. H. Gallagher, and R. D. Ziemian, Matrix Structural Analysis, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [14] T. H. G. Megson, Structural and Stress Analysis, 4th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [15] S. K. Chakrabarti, Ed., Handbook of Offshore Engineering. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2005.
- [16] B. C. Gerwick, Jr., Construction of Marine and Offshore Structures, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007.
- [17] S. E. Abdel Raheem, “Nonlinear response of fixed jacket offshore platform under structural and wave loads,” Coupled Syst. Mech., vol. 2, no. 1, pp. 111–126, 2013, doi: 10.12989/csm.2013.2.1.111.



- [18] N. A. Othman and M. H. Mohd, "Response of the offshore jacket platform at its ultimate strength under operating and extreme loads: A Malaysian waters case study," *Ships Offshore Struct.*, vol. 19, no. 11, pp. 1805–1826, 2024, doi: 10.1080/17445302.2024.2312726.
- [19] Z. Wang, S. K. Mantey, and X. Zhang, "A numerical tool for efficient analysis and optimization of offshore wind turbine jacket substructure considering realistic boundary and loading conditions," *Mar. Struct.*, vol. 95, Art. no. 103605, 2024, doi: 10.1016/j.marstruc.2024.103605.
- [20] E. Zavvar et al., "Analysis of tubular joints in marine structures: A comprehensive review," *Mar. Struct.*, vol. 99, Art. no. 103702, 2025, doi: 10.1016/j.marstruc.2024.103702.
- [21] M. J. Mia, M. S. Islam, and M. M. Rahman, "Numerical analysis of tubular XT joint of jacket type offshore structures under static loading," *Bangladesh Marit. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 299–318, 2022, doi: 10.70279/bmj-v6-i1-1057.
- [22] A. Shittu, A. Kolios, and A. Mehmanparast, "A systematic review of structural reliability methods for deformation and fatigue analysis of offshore jacket structures," *Metals*, vol. 11, no. 1, Art. no. 50, 2021, doi: 10.3390/met11010050.
- [23] A. Motlagh, N. Shabakhty, and A. Kaveh, "Design optimization of jacket offshore platform considering fatigue damage using genetic algorithm," *Ocean Eng.*, vol. 227, Art. no. 108869, 2021, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108869.
- [24] Setiawan, D. M. Rosyid, and R. W. Prastianto, "Pushover analysis of ageing offshore jacket platform in shallow water under extreme storm and mitigation strategy for platform's life extension," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 12–34, 2025.
- [25] S. F. Sumardi and D. M. Rosyid, "Jacket structure design optimization to reach minimum construction cost," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 47–54, 2025, doi: 10.12962/j25481479.v10i1.22293.
- [26] J. Häfele, M. Damiani, R. King, and P. Gebhardt, "A systematic approach to offshore wind turbine jacket predesign and optimization," *Wind Energy Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 553–572, 2018, doi: 10.5194/wes-3-553-2018.
- [27] S. Zheng, Y. Wang, Z. Shi, and X. Zhang, "Efficient optimization design method of jacket structures for offshore wind turbines," *Mar. Struct.*, vol. 89, Art. no. 103372, 2023, doi: 10.1016/j.marstruc.2023.103372.
- [28] M. A. Lotfollahi-Yaghin and H. Ahmadi, "Effect of geometrical parameters on SCF distribution along the weld toe of tubular KT-joints under balanced axial loads," *Int. J. Fatigue*, vol. 32, no. 4, pp. 703–719, 2010, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.10.008.