

Analisis Perilaku Portal 3 Dimensi pada *Leg System* Tipe *Jacket* terhadap Beban Vertikal Menggunakan Metode Elemen hingga dengan SAP2000

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

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

*arifyadi19@gmail.com

Abstrak

Struktur *jacket* merupakan tipe struktur rangka tiga dimensi yang banyak diaplikasikan pada bangunan lepas pantai untuk menopang beban vertikal dan lateral. Studi mengenai respon dasar *leg system* terhadap beban vertikal murni penting dilakukan sebagai langkah awal sebelum analisis dengan beban lingkungan yang lebih kompleks. Penelitian ini bertujuan menganalisis perilaku struktur portal tiga dimensi pada *leg system* tipe *jacket* menggunakan metode elemen hingga berbasis SAP2000. Pemodelan dilakukan pada struktur 4-leg dengan *brace* diagonal dan horizontal menggunakan penampang silinder baja ASTM A992. Beban vertikal berupa empat beban terpusat masing-masing 1 kN diaplikasikan pada top brace. Hasil simulasi menunjukkan perpindahan maksimum $U_z = 0.560$ m, sedangkan perpindahan lateral maksimum $U_x/U_y = 0.245$ m. Gaya aksial tekan maksimum pada leg sebesar 1059.44 kN, sementara gaya tarik maksimum sebesar 7.41 kN. Tegangan maksimum mencapai 620.75 MPa pada brace tengah akibat konsentrasi kekakuan dan momen lokal. Torsi maksimum sebesar 3.42 kNm muncul sebagai akibat ketidaksimetrian kekakuan antar elemen. Penelitian ini memberikan pemahaman dasar mengenai deformasi global, distribusi gaya dalam, dan titik kritis struktur *jacket* akibat beban vertikal murni dan dapat digunakan sebagai dasar analisis yang lebih kompleks.

Kata Kunci: beban vertikal, deformasi struktur, FEM, *jacket structure*, SAP2000

Abstract

Jacket structures are a type of three-dimensional frame structure that is widely used in offshore structures to support vertical and lateral loads. Studies on the basic response of leg systems to pure vertical loads are important as a preliminary step before analyzing more complex environmental loads. This study aims to analyze the behavior of a three-dimensional portal structure on a jacket-type leg system using the SAP2000 finite element method. Modeling was performed on a 4-leg structure with diagonal and horizontal bracing using ASTM A992 steel cylindrical cross-sections. Vertical loads in the form of four concentrated loads of 1 kN each were applied to the top brace. The simulation results show a maximum displacement of $U_z = 0.560$ m, while the maximum lateral displacement is $U_x/U_y = 0.245$ m. The maximum axial compressive force on the leg is 1059.44 kN, while the maximum tensile force is 7.41 kN. The maximum stress reaches 620.75 MPa on the center brace due to the concentration of stiffness and local moments. The maximum torsion of 3.42 kNm occurs as a result of the asymmetry of stiffness between elements. This study provides a basic understanding of global deformation, internal force distribution, and critical points of the jacket structure due to pure vertical loads and can be used as a basis for more complex analyses.

Keywords: vertical load, structural deformation, FEM, *jacket structure*, SAP2000

PENDAHULUAN

Struktur *jacket* adalah struktur rangka baja tiga dimensi yang digunakan secara luas pada instalasi lepas pantai, seperti platform produksi minyak dan gas, fasilitas eksplorasi, dan anjungan pengeboran [1][10][17]. Sistem leg berfungsi sebagai elemen utama penahan beban vertikal dan sebagian beban lateral. Kekakuan dan stabilitas leg system sangat penting karena menentukan kemampuan struktur menopang equipment deck, modul proses, serta beban operasional lainnya [1][3][16].

Analisis struktur *jacket* umumnya mempertimbangkan kombinasi beban kompleks seperti gelombang, angin, arus, dan beban seismik [2][3][11]. Namun, sebelum masuk dalam analisis tersebut, penting untuk memahami respons dasar struktur terhadap beban vertikal murni. Respons ini mencakup deformasi, distribusi gaya aksial, momen lentur, geser, torsi, dan tegangan pada elemen-elemen utama rangka [7][8][20]. Pemahaman dasar ini menjadi pondasi penting untuk menentukan kekakuan struktur, karakter distribusi gaya internal, dan identifikasi titik kritis pada struktur [12][15].

Metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan pendekatan paling umum digunakan dalam analisis struktur rangka 3D karena kemampuannya menganalisis interaksi antar elemen secara komprehensif [4][5][13]. SAP2000, sebagai perangkat analisis struktural, telah banyak digunakan untuk memodelkan rangka baja, termasuk struktur offshore, dengan dukungan analisis statik, dinamik, dan non-linear [6][12].



Gaya perpindahan (displacement arah x, y, z)

Dalam analisis struktur jacket, perpindahan translasi (displacement) pada arah x, y, dan z dinyatakan secara matematis dari solusi persamaan keseimbangan elastis berikut [4][13]:

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

Gaya Aksial

Secara umum, untuk elemen batang dalam *model finite element* SAP2000, tegangan aksial dihitung menggunakan rumus [7][9]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2)$$

Gaya Tegangan

Rumus utama yang digunakan dalam SAP2000 untuk gaya tegangan akibat beban vertikal pada struktur jacket adalah [6][8]:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M \cdot c}{I} \quad (3)$$

Gaya Torsi

Rumus torsi umum [20]:

$$T = F \times r \quad (4)$$

Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pemahaman perilaku struktur jacket terhadap pembebanan vertikal. Pertama, penelitian menyajikan analisis lengkap mengenai respons leg system jacket terhadap beban vertikal murni sebesar 1 kN per brace. Kedua, penelitian menyediakan interpretasi teknis yang mendalam dari hasil deformasi global, gaya aksial, torsi, dan tegangan berdasarkan output perangkat lunak SAP2000 [6]. Ketiga, penelitian ini menghadirkan model edukatif yang efektif menjembatani teori dasar metode elemen hingga (FEM) dengan penerapannya pada struktur lepas pantai [4][5][13]. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi referensi awal yang kuat bagi pembaca untuk memahami perilaku dasar struktur jacket sebelum melangkah ke analisis beban lingkungan yang lebih kompleks [2][11].

STRUCTURAL MODELING

Pemodelan struktur dilakukan berdasarkan pendekatan rigid-joint 3D frame menggunakan elemen frame SAP2000 [6][12]. Struktur jacket yang dimodelkan terdiri dari 4 leg vertikal yang dihubungkan oleh brace diagonal dan brace horizontal pada beberapa level [1][17]. Geometri struktur ditunjukkan dalam Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Tabel 1. Dimensi Elemen Struktur

Elemen	Diamater(m)	Tebal (m)
<i>Leg</i>	1.80	0.04
<i>Top Brace</i>	0.90	0.06
<i>Middle Brace</i>	1.20	0.06
<i>Horizontal Brace</i>	0.90	0.03

Tabel 2. Panjang *Brace* Diagonal

Elemen	Panjang(m)
<i>Bace 1</i> (teratas)	7.141
<i>Brace 2</i>	8.6603
<i>Brace 3</i>	10.341
<i>Brace 4</i> (terbawah)	12.1244

Tabel 3. Dimensi *Brace* Horizontal

Elemen	Dimensi (m)
Level 1	4 × 4
Level 2	6 × 6
Level 3	8 × 8
Level 4	10 × 10
<i>Base</i>	12 × 12

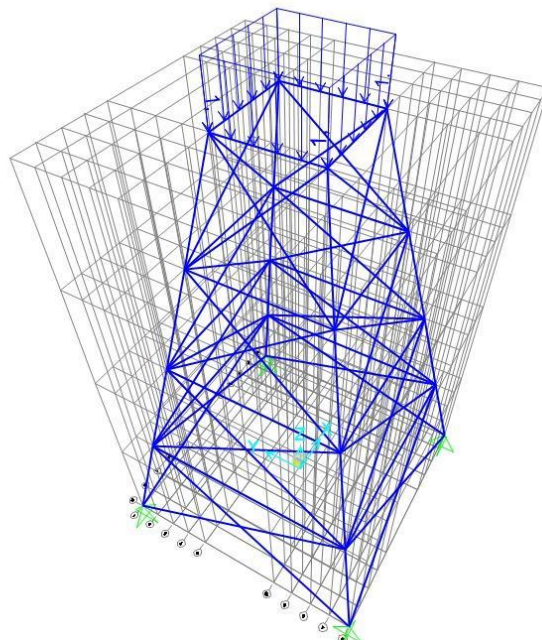
Material utama yang digunakan dalam pemodelan struktur ini adalah baja ASTM A992, yang banyak diaplikasikan pada struktur bangunan dan jembatan karena kekuatannya yang tinggi [7][9]. ASTM A992 memiliki modulus elastisitas sebesar 200 GPa, rasio Poisson 0,30, densitas 7850 kg/m³, dan kekuatan luluh (yield strength) minimum sebesar 345 MPa, sehingga memenuhi standar desain untuk menahan beban aksial dan lentur pada berbagai aplikasi struktural [3][17].

Sistem penumpu dimodelkan dengan keempat leg pada level dasar diberi boundary condition sebagai fixed support, yaitu semua derajat kebebasan translasi dan rotasi (Ux, Uy, Uz, Rx, Ry, Rz) di titik tumpu sepenuhnya ditahan [4][12]. Selain itu, asumsi rigid joint diterapkan pada seluruh sambungan antar elemen untuk memastikan tidak ada rotasi relatif pada koneksi struktur, sehingga setiap momen dan gaya dapat diteruskan secara efisien ke seluruh sistem struktur [8][20].

Model numerik menggunakan elemen frame 3D, yang mampu memikul gaya aksial, momen lentur, gaya geser, dan torsi, serta kompatibel dengan sistem koordinat global (X, Y, Z) pada perangkat lunak analisis struktur SAP2000 [6][12]. Dengan pendekatan ini, respons struktur terhadap beban dapat dianalisis secara menyeluruh, baik dari sisi kekakuan, kelenturan, maupun distribusi beban pada kerangka utama struktur [4][13].

ANALYSIS CASES

Analisis struktur dilakukan menggunakan satu load case dengan pendekatan statik linier [6][12]. Fokus pembebanan pada load case ini adalah beban vertikal murni, tanpa pemberian beban lateral, sehingga memudahkan penelaahan respons struktur hanya terhadap gaya-gaya vertikal. Beban yang diaplikasikan meliputi self-weight yang secara otomatis dihitung oleh perangkat lunak SAP2000, serta beban terpusat sebesar 1 kN yang diterapkan pada masing-masing top brace, sehingga total beban terpusat mencapai 4 kN. Dengan asumsi ini, analisis dapat memetakan distribusi gaya dan respon struktur terhadap beban vertikal secara spesifik, mempertimbangkan kondisi pembebanan yang sederhana namun representatif sesuai fokus studi [1][6].

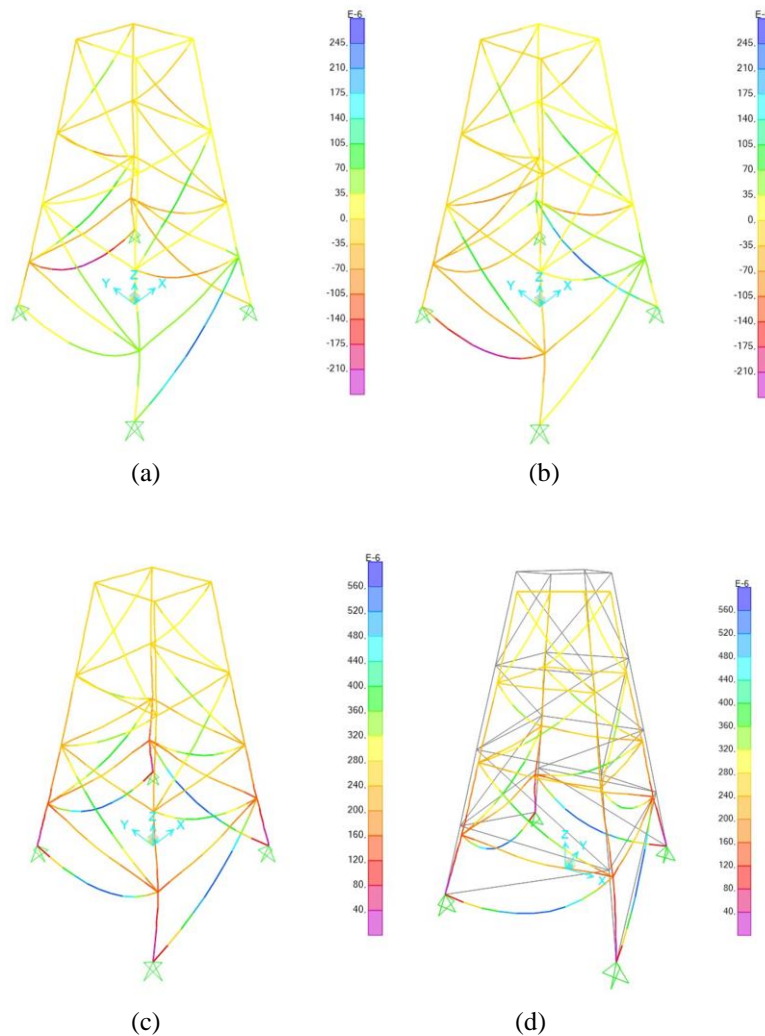


Gambar 1. Pembebanan pada Struktur

HASIL DAN PEMBAHASAN

Global Displacement

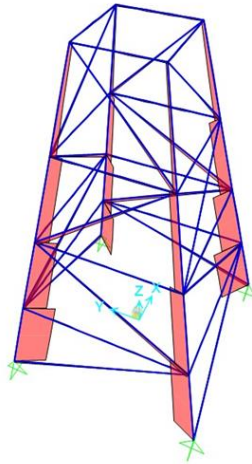




Gambar 2. (a) *Contour Component Ux*, (b) *Contour Component Uy*, (c) *Contour Component Uz*, (d) *Resultan*

Hasil analisis menunjukkan perpindahan maksimum pada struktur dengan nilai $UX_{max} = 0,245$ m, $UY_{max} = 0,245$ m, dan $UZ_{max} = 0,560$ m. Nilai perpindahan vertikal (UZ) memberikan respons terbesar, sesuai dengan karakter pembebanan yang dominan vertikal [7][20]. Sedangkan perpindahan horizontal (UX dan UY) muncul sebagai akibat dari eksentrisitas beban, ketidaksimetrian kekakuan antar brace, serta interaksi antara elemen diagonal dan horizontal dalam struktur [8][12]. Perpindahan lateral sebesar 0,245 m ini menunjukkan bahwa struktur jacket memiliki tingkat fleksibilitas moderat pada arah horizontal, meskipun beban utama yang bekerja bersifat vertikal [10][16]. Kondisi ini penting untuk dipertimbangkan dalam desain agar struktur tetap stabil dan aman terhadap perpindahan yang terjadi [3][17].

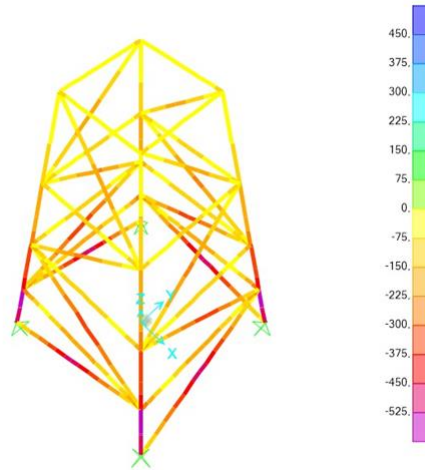
Axial Force Distribution



Gambar 3. Axial Force

Distribusi gaya aksial pada struktur menunjukkan nilai maksimum gaya tekan sebesar $-1059,44$ kN dan gaya tarik maksimum sebesar $+7,41$ kN. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem leg berperan sebagai komponen penopang utama yang didominasi oleh gaya tekan (compression-dominated) [1][7]. Gaya tarik kecil yang muncul pada brace disebabkan oleh transmisi gaya melalui elemen diagonal, yang berfungsi menghubungkan dan mendistribusikan beban [8][12]. Pola distribusi gaya aksial ini konsisten dengan perilaku struktur rangka tipe offshore yang umum ditemukan dalam literatur teknis [1][10]. Analisis ini menegaskan pentingnya leg sebagai elemen utama dalam menahan beban vertikal dan memastikan kestabilan struktur secara keseluruhan [17].

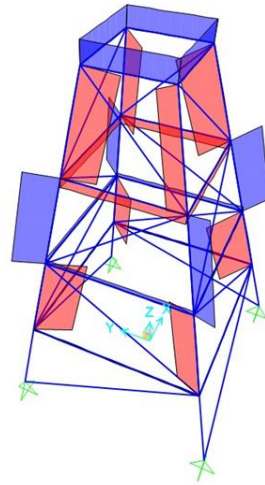
Stress Analysis



Gambar 4. Stress Contour

Analisis tegangan pada struktur menunjukkan nilai maksimum sebesar $620,75$ MPa dan nilai minimum $-1018,05$ MPa. Tegangan tertinggi teridentifikasi pada brace tengah, yang disebabkan oleh konsentrasi momen lentur, perubahan kekakuan antar-level brace, serta transfer gaya dari elemen leg ke brace [7][8]. Nilai tegangan maksimum ini secara signifikan melebihi tegangan luluh material (F_y) sebesar 345 MPa, sehingga dalam kondisi nyata diperlukan tindakan rekayasa lebih lanjut, seperti penambahan perkuatan (reinforcement), redesign diameter brace, atau peningkatan tebal elemen untuk memastikan keamanan dan keandalan struktur dalam menahan beban kerja [3][17][18].

Torsional Response



Gambar 5. Respon Torsi Struktur

Analisis respon torsi struktur menunjukkan nilai torsi maksimum sebesar 3,42 kNm dan torsi minimum $-4,6$ kNm. Munculnya momen torsi ini meskipun tidak terdapat beban lateral mengindikasikan bahwa struktur tiga dimensi dapat mengalami rotasi internal akibat ketidaksimetrian elemen-elemen penyusunnya [12][20]. Peran brace diagonal sangat penting dalam mengendalikan fenomena twist atau torsi pada rangka struktur [8][10]. Temuan ini sesuai dengan teori frame 3D yang dijelaskan oleh McGuire et al., yang menegaskan bahwa ketidaksimetrian geometri struktur dapat menimbulkan efek torsi meskipun pembebanan utama bersifat vertikal [12].

Critical Zones

Titik-titik kritis dalam struktur jacket teridentifikasi pada beberapa lokasi utama yang mempengaruhi keamanan dan performa struktur. Sambungan brace tengah merupakan lokasi dengan tegangan maksimum tertinggi, sedangkan pada base leg ditemukan perpindahan vertikal terbesar. Selain itu, node tempat brace bertemu mengalami torsi lokal yang signifikan [8][12]. Zona-zona ini menjadi prioritas utama dalam proses desain dan penguatan struktur jacket untuk memastikan kestabilan dan daya tahan terhadap beban kerja yang diterima [1][3][17].

KESIMPULAN

Analisis struktur terhadap pembebanan vertikal pada model jacket memberikan beberapa temuan penting yang menggambarkan perilaku dan respons struktur secara keseluruhan. Beban vertikal sebesar 1 kN pada masing-masing top brace menghasilkan deformasi signifikan dengan nilai maksimum perpindahan vertikal (UZ) sebesar 0,560 m dan perpindahan horizontal (UX/UY) sebesar 0,245 m [7][20]. Gaya aksial tekan maksimum mencapai 1059,44 kN, yang menunjukkan bahwa leg system merupakan elemen dominan dalam menahan beban vertikal [1][10]. Selain itu, tegangan maksimum sebesar 620,75 MPa terjadi pada brace menengah akibat konsentrasi momen dan kekakuan lokal, sehingga menjadi indikasi area potensial terjadinya kegagalan struktural [3][8]. Meskipun pembebanan bersifat vertikal, struktur tetap mengalami torsi kecil sebesar 3,42 kNm yang disebabkan oleh ketidaksimetrian geometri struktur dan transfer gaya antar brace [12][20]. Secara keseluruhan, metode elemen hingga yang diterapkan melalui perangkat lunak SAP2000 terbukti efektif dalam menggambarkan perilaku awal struktur jacket terhadap beban statik sederhana, sehingga dapat dijadikan dasar untuk analisis lebih lanjut seperti beban gelombang, angin, dan beban dinamik [4][5][6].

REFERENSI

- [1] American Petroleum Institute, API RP 2A-WSD: Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 2007.
- [2] DNVGL, DNVGL-RP-C205: Environmental Conditions and Environmental Loads, 2017.
- [3] DNVGL, DNVGL-OS-C101: Design of Offshore Steel Structures, 2015.
- [4] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2001.
- [5] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2015.

- [6] Computers and Structures Inc., *SAP2000 Analysis Reference Manual*, 2017.
- [7] J. M. Gere and S. Timoshenko, *Mechanics of Materials*. Boston, MA, USA: PWS Publishing, 1997.
- [8] T. H. G. Megson, *Structural and Stress Analysis*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2019.
- [9] F. P. Beer, E. R. Johnston, J. T. DeWolf, and D. Mazurek, *Mechanics of Materials*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.
- [10] S. Chakrabarti, *Handbook of Offshore Engineering*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2005.
- [11] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Structures*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [12] W. McGuire, R. Gallagher, and R. D. Ziemian, *Matrix Structural Analysis*. New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [13] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [14] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [15] T. Moan and M. Shinozuka, *Structural Reliability Theory and Its Applications*. New York, NY, USA: Springer, 1988.
- [16] Y. Bai and Q. Bai, *Subsea Engineering Handbook*. Houston, TX, USA: Gulf Professional Publishing, 2010.
- [17] ISO, *ISO 19902: Petroleum and Natural Gas Industries—Fixed Steel Offshore Structures*, Geneva, Switzerland, 2007.
- [18] ABS, *Guide for Building and Classing Floating Production Installations*, Houston, TX, USA, 2018.
- [19] J. F. Wilson and E. F. K. Fjeld, *Dynamic Response of Marine Structures*. New York, NY, USA: Wiley, 1988.
- [20] B. S. Timoshenko and D. H. Young, *Theory of Structures*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1965.