

Evaluasi dan Analisis Sensitivitas Frame 2D Tipe Portal Terhadap Variasi Geometri dan Kondisi Batas Menggunakan SAP2000

Muhammad Guntur Kasriady*, Andi Aulia Novianti, Husnul Khotimah, dan Muhammad Zubair Muis Alie

Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

*muhguntur1410@gmail.com

Abstract

The stiffness of a two-dimensional portal frame is governed by the interaction among geometry, section properties, joint rigidity, support restraints, and loading pattern. This paper revises and expands an initial SAP2000 analysis of a 2D portal frame by incorporating a unit audit, model-data reconstruction, normalized sensitivity formulations, a verification procedure, and a mechanically consistent interpretation of the results. The baseline model represents a one-story, one-bay rigid portal made of ASTM A992 steel and subjected to vertical and horizontal distributed loads under linear static analysis. The original outputs show maximum raw values of 7086.87 for shear force, 20673.05 for bending moment, -5874.94 for compressive axial force, and 0.2022 for lateral displacement. Because the screenshots do not explicitly preserve the active output units, these values are treated as raw software results; under an N-m unit system, the force values correspond to 7.087 kN and 5.875 kN, while the moment corresponds to 20.673 kN·m. The normalized screening analysis demonstrates that the flexural response is highly sensitive to column height and beam span because displacement scales approximately with the cube of member length. A 10% increase in height is expected to increase lateral displacement by about 33.1%, whereas a 20% increase produces an increase of about 72.8% when flexural action dominates. A 20% reduction in the second moment of area increases deformation by approximately 25%. Support conditions also modify moment redistribution and drift, with fixed-fixed bases providing the highest restraint compared with configurations involving rotational releases. The revised study emphasizes that SAP2000 results should not be used for design decisions before the model units, geometry, reactions, rotations, and section properties have been independently verified.

Keywords: boundary conditions, portal frame, SAP2000, structural stiffness, sensitivity analysis, unit audit.

PENDAHULUAN

Portal dua dimensi merupakan idealisasi dasar yang banyak digunakan untuk mempelajari aliran gaya, kekakuan lateral, distribusi momen, dan deformasi pada struktur bangunan, fasilitas industri, serta komponen rangka pada sistem kelautan. Walaupun geometri portal terlihat sederhana, responsnya merupakan hasil interaksi antara deformasi aksial kolom, lentur balok dan kolom, kontinuitas rotasi pada sambungan, serta restrain translasi dan rotasi pada tumpuan. Oleh karena itu, perubahan kecil pada tinggi kolom, panjang bentang, momen inersia, atau kondisi tumpuan dapat menghasilkan perubahan respons yang tidak linier secara proporsional [3], [8], [9].

Kekakuan merupakan parameter penghubung antara gaya dan perpindahan. Pada sistem linear elastik, hubungan global dinyatakan melalui matriks kekakuan. Nilai elemen matriks tersebut bergantung pada modulus elastisitas, luas penampang, momen inersia, panjang elemen, orientasi lokal, serta kompatibilitas pada simpul [4], [12], [13]. Untuk portal yang didominasi lentur, pengaruh panjang menjadi sangat besar karena komponen kekakuan lentur berbanding terbalik dengan pangkat tiga panjang elemen. Konsekuensinya, perubahan geometri yang tampak kecil dapat memperbesar drift dan redistribusi gaya dalam secara bermakna [6], [10].

SAP2000 menyediakan formulasi elemen frame yang dapat memodelkan gaya aksial, gaya geser, momen lentur, torsi, deformasi, release ujung, pegas rotasi, efek P-Delta, dan berbagai jenis kombinasi beban [5]. Kemampuan tersebut menjadikan SAP2000 sesuai untuk studi parametrik. Namun, hasil perangkat lunak tidak otomatis benar hanya karena analisis berhasil dijalankan. Model harus melalui verifikasi geometri, unit, properti penampang, orientasi sumbu lokal, beban, tumpuan, kompatibilitas simpul, reaksi, dan keseimbangan gaya [21], [26].

Naskah awal melaporkan portal satu bentang dan satu tingkat yang menerima beban merata vertikal dan horizontal. Hasilnya disajikan melalui diagram gaya geser, momen, gaya aksial, dan bentuk terdeformasi. Akan tetapi, terdapat ketidakkonsistenan antara angka pada gambar dan satuan yang ditulis pada teks. Nilai gaya 7086,87



dan 5874,94 ditulis sebagai kN, padahal apabila output aktif menggunakan N-m, angka tersebut harus dikonversi menjadi sekitar 7,087 kN dan 5,875 kN. Selain itu, tabel geometri menuliskan jumlah tingkat dan bentang sebagai 0,1, yang secara fisik tidak bermakna untuk parameter diskrit. Ketidakkonsistenan ini dapat mengubah kesimpulan mengenai keamanan dan kelayakan desain.

Permasalahan lain adalah penggunaan istilah analisis sensitivitas tanpa matriks variasi yang jelas. Analisis sensitivitas seharusnya mendefinisikan parameter dasar, rentang perubahan, indikator respons, dan ukuran sensitivitas. Perbandingan satu model tunggal belum cukup untuk menunjukkan sensitivitas. Pendekatan yang lebih tepat adalah menjalankan beberapa skenario atau, apabila data model lengkap belum tersedia, melakukan screening analitis ternormalisasi sebagai dasar untuk menyusun simulasi parametrik [14], [17].

Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian revisi ini memiliki empat tujuan. Pertama, menata ulang data geometri, material, beban, tumpuan, dan output model. Kedua, mengoreksi interpretasi satuan dan membedakan antara nilai mentah SAP2000 dengan nilai yang telah dikonversi. Ketiga, menyusun kerangka sensitivitas geometri dan kondisi batas yang dapat direplikasi. Keempat, menjelaskan implikasi mekanika struktur dari variasi tinggi, bentang, momen inersia, luas penampang, dan kekangan rotasi.

Kontribusi penelitian adalah penyediaan prosedur audit dan validasi untuk model portal sederhana. Prosedur ini penting untuk pembelajaran metode matriks kekakuan karena kesalahan unit atau kondisi batas sering menghasilkan output yang tampak numerik tetapi tidak memiliki makna fisik. Pada konteks struktur kelautan, portal 2D juga dapat digunakan sebagai submodel awal untuk bent, frame modul, deck frame, atau sistem penyangga sebelum model tiga dimensi dan beban lingkungan diterapkan [1], [2], [20].

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada perilaku linear elastik. Evaluasi kapasitas penampang, local buckling, lateral-torsional buckling, sambungan, fatigue, dan beban dinamik tidak dilakukan. Standar desain seperti AISC 360, ASCE 7, Eurocode 3, dan ISO 19902 digunakan sebagai rujukan konseptual untuk menunjukkan bahwa verifikasi kekuatan dan stabilitas merupakan tahap lanjutan yang terpisah dari analisis kekakuan awal [18]-[20], [25].

LANDASAN TEORI

Kekakuan Aksial dan Lentur Elemen Frame

Elemen frame 2D mempunyai tiga derajat kebebasan pada setiap simpul, yaitu translasi arah lokal atau global, translasi tegak lurus elemen, dan rotasi bidang. Formulasi elemen menggabungkan respons batang aksial dan balok lentur. Dalam kondisi elastik linear, kekakuan aksial ditentukan oleh modulus elastisitas E , luas penampang A , dan panjang L [6], [8].

$$k_{ax} = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

Persamaan (1) menunjukkan bahwa kenaikan luas penampang atau modulus elastisitas menaikkan kekakuan aksial secara linear, sedangkan pertambahan panjang menurunkannya secara invers. Untuk respons lentur, salah satu koefisien utama matriks kekakuan elemen adalah sebagai berikut [4], [9], [12].

$$k_b = \frac{12EI}{L^3} \quad (2)$$

Hubungan pangkat tiga pada Persamaan (2) menjelaskan mengapa tinggi kolom dan panjang bentang menjadi parameter yang sangat sensitif. Jika panjang naik 10% tanpa perubahan E dan I , koefisien kekakuan lentur turun menjadi sekitar 75,1% dari kondisi dasar. Sebaliknya, perpindahan pada mekanisme lentur ideal meningkat menjadi sekitar 133,1%.

$$[K]\{d\} = \{F\} \quad (3)$$

Setelah matriks kekakuan elemen ditransformasikan dari koordinat lokal ke koordinat global dan dirakit, kondisi batas diterapkan dengan menghilangkan atau memodifikasi derajat kebebasan yang dikekang. Solusi

Persamaan (3) menghasilkan vektor perpindahan nodal. Gaya ujung elemen kemudian diperoleh dengan mengalikan matriks kekakuan elemen dengan vektor deformasi lokal dan menambahkan fixed-end forces akibat beban terdistribusi [8], [9], [21].

Pengaruh Geometri Portal

Tinggi kolom memengaruhi kekakuan lateral, momen dasar, dan drift. Untuk kolom yang bekerja dominan dalam lentur, kekakuan lateral berbanding terbalik dengan H^3 . Kenaikan tinggi dapat menurunkan kekakuan secara cepat dan memperbesar efek orde kedua ketika gaya aksial tekan bekerja secara bersamaan. Dalam desain nyata, perubahan tinggi juga memengaruhi panjang efektif dan kapasitas stabilitas kolom [16], [27], [28].

Panjang bentang memengaruhi kekakuan balok, momen positif di tengah bentang, momen negatif pada sambungan, serta kompatibilitas rotasi antara balok dan kolom. Balok yang lebih panjang dengan penampang sama menjadi lebih fleksibel sehingga rotasi simpul meningkat. Perubahan ini menggeser pembagian momen antara balok dan kolom dan dapat memperbesar sidesway [3], [10], [22].

Rasio kekakuan balok-kolom merupakan indikator yang lebih informatif daripada dimensi tunggal. Secara sederhana, rasio dapat dinyatakan melalui $\left(\frac{EI}{L}\right)$ balok dibandingkan dengan $\left(\frac{EI}{H}\right)$ kolom. Balok yang relatif kaku menahan rotasi puncak kolom dan meningkatkan frame action, sedangkan balok yang relatif fleksibel memungkinkan rotasi simpul lebih besar. Karena itu, studi sensitivitas sebaiknya mengubah geometri dan properti penampang secara terpisah sebelum mengevaluasi interaksinya.

Kondisi Batas dan Kekakuan Sambungan

Kondisi batas menentukan derajat kebebasan yang diizinkan pada dasar portal. Tumpuan jepit menahan translasi dan rotasi, tumpuan sendi menahan translasi tetapi membebaskan rotasi, sedangkan tumpuan rol membebaskan satu arah translasi. Dalam model frame, pelepasan rotasi mengubah jalur momen dan dapat meningkatkan perpindahan lateral. Pemilihan tumpuan harus mewakili kondisi fisik fondasi dan sambungan, bukan sekadar memudahkan analisis [8], [9].

Kekakuan sambungan sebenarnya berada pada spektrum antara sendi ideal dan jepit ideal. Sambungan semi-rigid dapat dimodelkan dengan pegas rotasi. Nilai pegas yang sangat kecil mendekati sendi, sedangkan nilai sangat besar mendekati sambungan kaku. Analisis parametrik terhadap kekakuan rotasi dapat menunjukkan titik ketika peningkatan kekakuan sambungan tidak lagi menghasilkan pengurangan drift yang signifikan [3], [16].

Untuk portal tanpa bracing, kombinasi tumpuan dan kekakuan sambungan sangat menentukan kestabilan lateral. Model dapat menjadi mekanisme apabila terlalu banyak release diterapkan. SAP2000 biasanya memberikan peringatan instabilitas atau singularity, tetapi pengguna tetap perlu memeriksa deformasi yang tidak masuk akal dan derajat kebebasan tak terkekang [5], [26].

Definisi dan Indikator Sensitivitas

Sensitivitas mengukur perubahan respons akibat perubahan parameter. Untuk parameter p dan respons R , sensitivitas ternormalisasi dapat dihitung dengan bentuk diferensial atau pendekatan beda hingga. Bentuk ternormalisasi memungkinkan perbandingan antarparameter yang mempunyai satuan berbeda [14], [17].

$$S_p^R = \left(\frac{p}{R}\right) \left(\frac{\partial R}{\partial p}\right) \quad (4)$$

$$SI = \frac{\left[\frac{R_i - R_0}{R_0}\right]}{\left[\frac{p_i - p_0}{p_0}\right]} \quad (5)$$

Nilai absolut SI yang lebih besar menunjukkan respons yang lebih peka. Tanda positif berarti respons meningkat ketika parameter meningkat, sedangkan tanda negatif berarti respons menurun. Untuk hubungan $\delta \propto L^3$, sensitivitas ternormalisasi teoretis terhadap L adalah sekitar +3. Untuk kekakuan $k \propto L^{-3}$, sensitivitasnya sekitar -3. Untuk $\delta \propto 1/I$, sensitivitas terhadap I adalah -1.

Audit Satuan dan Konsistensi Mekanika

SAP2000 dapat mengganti sistem satuan tampilan tanpa mengubah model dasar. Karena itu, angka pada layar hanya memiliki makna apabila label active units diketahui. Gaya, momen, tegangan, massa, dan perpindahan harus dikonversi secara konsisten. Kesalahan paling umum adalah membaca gaya dalam N sebagai kN, momen N·m sebagai kN·m, atau perpindahan mm sebagai m.

Pemeriksaan keseimbangan merupakan validasi minimum. Jumlah reaksi vertikal harus sama dengan total beban vertikal, jumlah reaksi horizontal harus sama dengan total beban horizontal, dan jumlah momen reaksi harus memenuhi keseimbangan global. Selain itu, tanda gaya aksial, diagram geser, dan diagram momen harus sesuai dengan pola pembebanan dan kondisi tumpuan [4], [21]. Dalam penelitian ini, audit satuan diperlakukan sebagai bagian dari metode, bukan catatan administratif. Hal ini diperlukan karena interpretasi salah satuan dapat menghasilkan rasio drift, tegangan, atau faktor keamanan yang salah beberapa orde besaran.

DATA DAN METODOLOGI

Sumber Data dan Rekonstruksi Model Dasar

Data dasar diperoleh dari naskah awal dan tangkapan layar output SAP2000. Model terdiri atas dua kolom dan satu balok yang membentuk portal satu tingkat serta satu bentang. Sambungan balok-kolom dimodelkan kaku. Data tabel asli memuat beberapa nilai desimal yang tidak konsisten dengan jenis parameter. Oleh sebab itu, revisi membedakan antara data yang terkonfirmasi dan data yang harus diverifikasi kembali pada file model .sdb.

Tabel 1. Rekonstruksi parameter model dasar dan status verifikasinya.

Parameter	Nilai kerja revisi	Status dan catatan
Jumlah tingkat	1	Tabel awal menulis 0,1; direkonstruksi sebagai satu tingkat.
Jumlah bentang	1	Tabel awal menulis 0,1; direkonstruksi sebagai satu bentang.
Tinggi portal	3,0 m	Rekonstruksi kerja dari konteks model; verifikasi wajib pada .sdb.
Lebar bentang	6,0 m	Rekonstruksi kerja dari konteks model; verifikasi wajib pada .sdb.
Tipe elemen	Frame 2D	Memikul aksial, geser, dan momen dalam bidang.
Sambungan atas	Rigid joint	Transfer momen penuh antara balok dan kolom.
Analisis	Linear static	Tidak mencakup P-Delta dan nonlinieritas material.

Material dan Properti Penampang

Material pada naskah awal dinyatakan sebagai baja ASTM A992 dengan modulus elastisitas 200 GPa, rasio Poisson 0,30, densitas 7850 kg/m³, dan tegangan luluh minimum 345 MPa. Nilai tersebut konsisten dengan pemodelan elastik baja struktural, tetapi jenis serta dimensi penampang balok dan kolom tidak tercantum. Karena momen inersia dan luas penampang menentukan kekakuan, ketidaklengkapan ini membatasi reproduksibilitas numerik absolut [6], [18].

Tabel 2. Properti material dan data penampang yang diperlukan.

Properti	Simbol	Nilai	Penggunaan dalam model
Modulus elastisitas	E	200 GPa	Kekakuan aksial dan lentur
Rasio Poisson	ν	0,30	Hubungan deformasi lateral material
Densitas	ρ	7850 kg/m ³	Perhitungan berat sendiri
Tegangan luluh	Fy	345 MPa	Rujukan kapasitas; tidak dievaluasi langsung
Luas penampang	A	Belum terdokumentasi	Wajib untuk EA dan gaya aksial
Momen inersia	I	Belum terdokumentasi	Wajib untuk EI dan drift

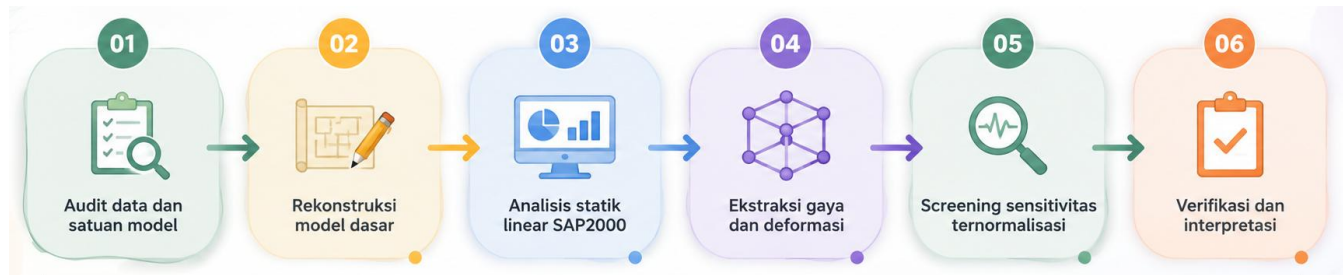
Pembebanan, Kondisi Batas, dan Kasus Analisis

Naskah awal menyebut beban terdistribusi vertikal dan horizontal sebesar 10 kN/m, serta pada bagian lain menyatakan 1 ton/m sebagai beban referensi. Karena 1 ton-force/m sekitar 9,81 kN/m, kedua nilai tersebut cukup dekat tetapi tidak identik. Revisi menggunakan 10 kN/m sebagai nilai nominal dan menempatkan perbedaan tersebut dalam daftar verifikasi input. Berat sendiri diaktifkan melalui self-weight multiplier pada load pattern gravitasi [5].

Kondisi tumpuan pada teks awal juga tidak konsisten: satu bagian menyatakan tumpuan dasar jepit, sedangkan bagian lain menyebut kombinasi sendi-rol dan jepit-jepit. Gambar output menunjukkan simbol tumpuan yang serupa pada kedua dasar, tetapi jenis rotasinya tidak dapat dipastikan dari gambar beresolusi rendah. Oleh karena itu, kondisi dasar untuk interpretasi hasil diperlakukan sebagai jepit-jepit, sedangkan variasi fixed-pinned dan pinned-pinned digunakan sebagai skenario sensitivitas konseptual.

Tabel 3. Kasus pembebanan dan kondisi batas untuk model dasar serta sensitivitas.

Komponen	Model dasar	Variasi sensitivitas
Beban vertikal merata	10 kN/m pada balok	Tetap pada semua skenario
Beban horizontal merata	10 kN/m pada elemen terkait	Tetap; lokasi diverifikasi pada .sdb
Berat sendiri	Aktif	Tetap
Tumpuan dasar	Jepit-jepit	Jepit-sendi; sendi-sendi; pegas rotasi
Nonlinieritas	Tidak aktif	P-Delta direkomendasikan sebagai studi lanjutan
Kombinasi beban	Satu kasus linear	Pisahkan V, H, dan V+H pada validasi



Gambar 1. Alur penelitian revisi, mulai dari audit data hingga interpretasi sensitivitas.

Matriks Variasi Parameter

Sensitivitas geometri dianalisis secara screening dengan rasio parameter 0,80; 0,90; 1,00; 1,10; dan 1,20 terhadap kondisi dasar. Pendekatan ini menghasilkan rentang $\pm 20\%$ yang cukup untuk mengidentifikasi kecenderungan tanpa mengubah mekanisme struktur secara ekstrem. Analisis screening menggunakan hubungan mekanika elastik ternormalisasi dan tidak diklaim sebagai hasil run tambahan SAP2000. Skenario SAP2000 yang sesungguhnya harus dijalankan dengan geometri dan penampang yang telah diverifikasi.

Tabel 4. Matriks parameter sensitivitas yang direkomendasikan.

Kelompok	Parameter	Rasio skenario	Respons utama
Geometri	Tinggi kolom H	0,80-1,20 H_0	Drift, momen dasar, rotasi simpul
Geometri	Panjang bentang L	0,80-1,20 L_0	Momen balok, lendutan, rotasi
Penampang	Momen inersia I	0,80-1,20 I_0	Drift dan momen redistribusi
Penampang	Luas A	0,80-1,20 A_0	Pemendekan aksial dan gaya aksial relatif
Batas	Kekakuan rotasi K_θ	0 hingga sangat besar	Drift, momen tumpuan, stabilitas
Analisis	P-Delta	Off/On	Amplifikasi drift dan momen

Prosedur Verifikasi

Prosedur verifikasi disusun dalam empat tingkat. Tingkat pertama memeriksa input dan unit. Tingkat kedua membandingkan reaksi dan respons dengan perhitungan analitis sederhana. Tingkat ketiga memeriksa aspek

numerik seperti release, orientasi sumbu lokal, joint connectivity, deformasi, dan peringatan instability. Tingkat keempat baru menilai kesesuaian terhadap kriteria desain [5], [18], [26].

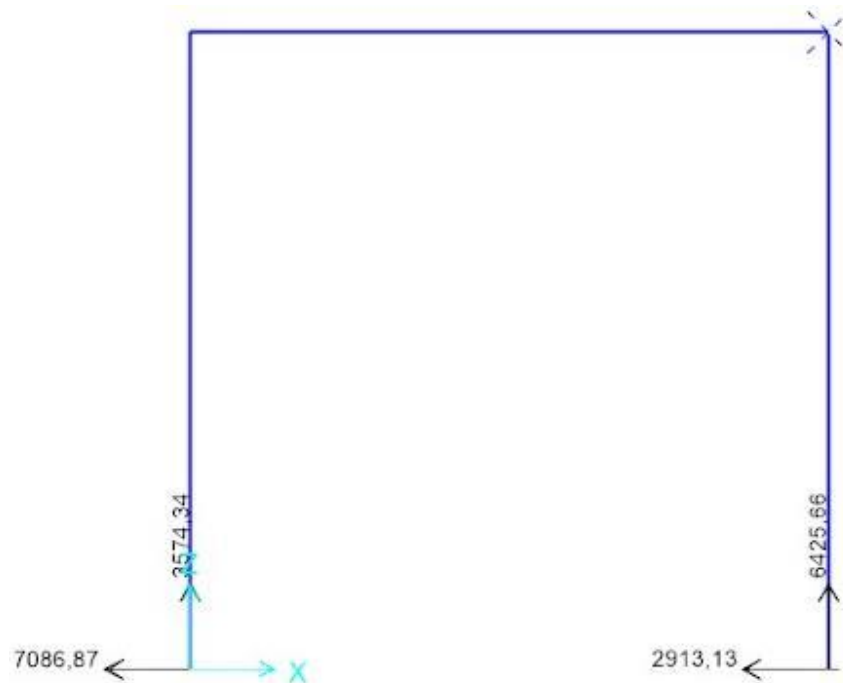


Gambar 2. Hierarki verifikasi sebelum output digunakan untuk keputusan desain.

HASIL MODEL DASAR DAN AUDIT OUTPUT

Konfigurasi Portal dan Jalur Beban

Model portal pada Gambar 3 menunjukkan dua kolom yang dihubungkan balok atas. Diagram awal memperlihatkan adanya reaksi horizontal di dasar dan deformasi sidesway. Jalur beban vertikal diteruskan dari balok ke kolom sebagai gaya aksial tekan dan momen ujung. Beban horizontal menghasilkan geser tingkat, momen pada sambungan, serta momen dasar. Karena sambungan atas dianggap kaku, rotasi balok dan kolom harus kompatibel [8], [9].

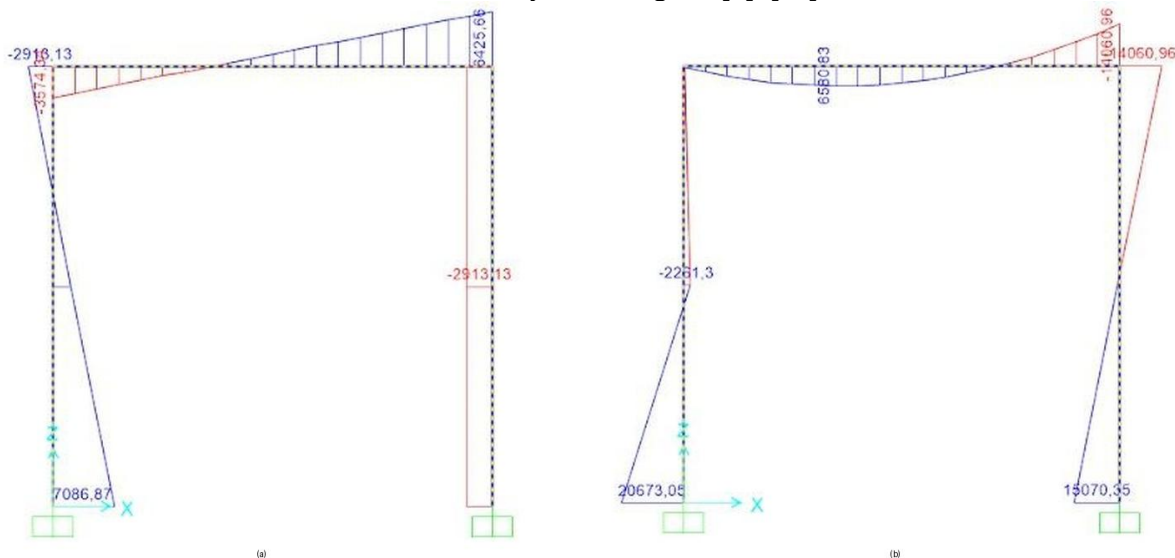


Gambar 3. Model portal 2D dan reaksi yang ditampilkan pada keluaran SAP2000.

Distribusi Gaya Geser dan Momen Lentur

Diagram gaya geser menunjukkan nilai mentah maksimum 7086,87 pada dasar kolom kiri dan sekitar 2913,13 pada kolom kanan. Jika unit aktif adalah N-m, nilai tersebut setara dengan 7,087 kN dan 2,913 kN. Pola gaya geser pada balok berubah secara linear akibat beban merata. Perbedaan reaksi antara sisi kiri dan kanan menunjukkan kombinasi beban atau kekangan yang tidak sepenuhnya simetris.

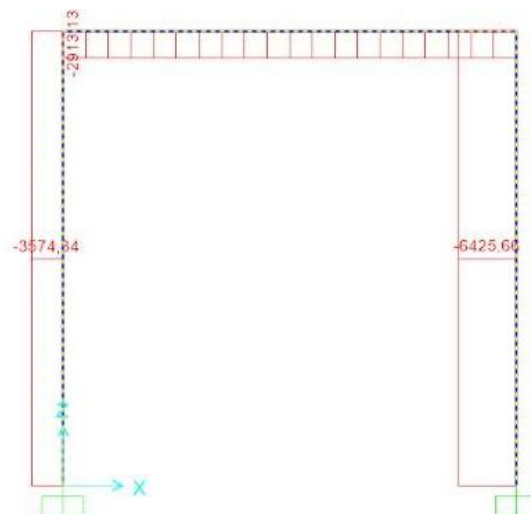
Diagram momen memperlihatkan nilai mentah 20673,05 pada dasar kolom kiri, 14070,35 pada dasar kolom kanan, momen negatif sekitar -2281,3 pada salah satu sambungan, dan momen positif sekitar 1060,96 pada daerah balok. Apabila unit aktif N-m, nilai momen dasar setara 20,673 kN·m dan 14,070 kN·m. Momen dasar yang lebih besar pada kolom kiri konsisten dengan gaya geser dasar yang lebih besar. Namun, keseimbangan momen global tetap harus diverifikasi dari tabel reaksi, bukan hanya dari diagram [4], [22].



Gambar 4. Distribusi gaya dalam: (a) gaya geser 2-2 dan (b) momen 3-3.

Distribusi Gaya Aksial

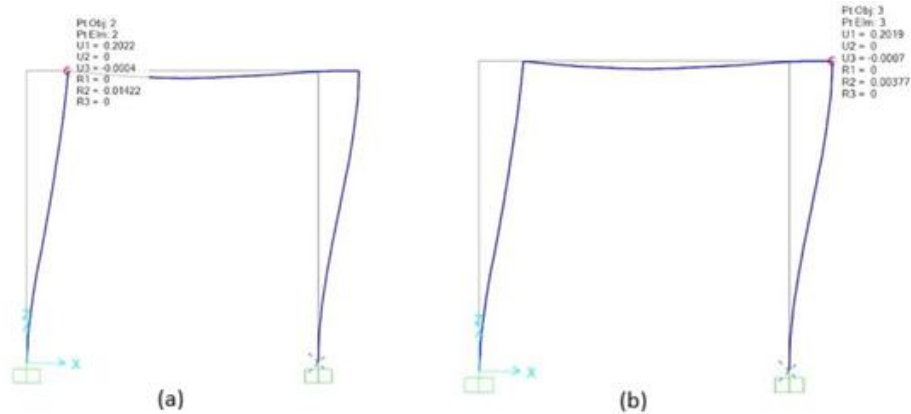
Gaya aksial mentah pada kolom kiri dan kanan berada sekitar -3574,94 hingga -6425,66 pada gambar, sedangkan teks awal menyebut -5425,66 dan -5874,94. Selisih antarangka menunjukkan kemungkinan pembacaan node atau load case yang berbeda. Tanda negatif menunjukkan tekan dalam konvensi output yang digunakan. Jika unit aktif N, gaya tekan berada pada kisaran beberapa kN, bukan ribuan kN. Karena beban vertikal pada balok diteruskan ke kedua kolom, distribusi aksial yang relatif konstan sepanjang tinggi merupakan pola yang diharapkan untuk model tanpa beban terdistribusi vertikal pada kolom [6], [14].



Gambar 5. Diagram gaya aksial pada kedua kolom portal.

Deformasi dan Perpindahan

Bentuk terdeformasi memperlihatkan sidesway ke arah kanan dan lendutan balok ke bawah. Pada salah satu gambar, label nodal menampilkan U1 sekitar 0,202, U3 sekitar -0,0004, dan R2 sekitar 0,01422. Pada gambar lain, U1 sekitar 0,319 dan R2 sekitar 0,00377. Nilai tersebut bertentangan dengan tabel awal yang menyatakan seluruh rotasi nol. Oleh sebab itu, tabel perpindahan harus diekspor ulang langsung dari SAP2000 dengan opsi show units dan load case yang sama.



Gambar 6. Bentuk terdeformasi dan nilai perpindahan/rotasi nodal dari dua tampilan output.

Perpindahan lateral maksimum 0,2022 hanya dapat dinilai terhadap drift setelah tinggi tingkat dipastikan. Jika tinggi 3,0 m, rasio drift sekitar $0,2022/3,0 = 0,0674$ atau 6,74%, yang sangat besar untuk struktur baja umum. Jika 0,2022 adalah mm, rasionya menjadi sangat kecil. Contoh ini menunjukkan bahwa kesimpulan aman atau tidak aman tidak boleh dibuat sebelum unit dan geometri dikunci. Kriteria drift pada standar desain juga bergantung pada fungsi struktur, jenis beban, dan kondisi layan [19], [25].

Ringkasan Audit Nilai Output

Berdasarkan audit, hasil dasar masih berguna untuk menunjukkan pola respons, tetapi belum cukup untuk penilaian keamanan. Informasi minimum yang harus disertakan adalah active units, section name, section properties, load pattern, load case, self-weight multiplier, support restraints, frame releases, geometry coordinates, dan tabel reaksi. Tanpa informasi tersebut, pembaca tidak dapat mereplikasi nilai absolut atau membandingkannya dengan kapasitas penampang.

Tabel 5. Audit inkonsistensi data dan interpretasi output model dasar.

Respons	Nilai mentah	Interpretasi awal	Interpretasi revisi
Geser maksimum	7086,87	7086,87 kN	7,087 kN apabila unit gaya N
Momen dasar kiri	20673,05	20673,05 kN·m	20,673 kN·m apabila unit momen N·m
Aksial tekan	-5874,94	-5874,94 kN	-5,875 kN apabila unit gaya N
Perpindahan U1	0,2022	0,2022 m	Unit harus dibaca dari active units
Rotasi R2	0 pada tabel	Tidak ada rotasi	Gambar menunjukkan R2 tidak nol
Geometri	0,1; 0,3; 0,6	Digunakan langsung	Kemungkinan kesalahan desimal/transkripsi

ANALISIS SENSITIVITAS TERNORMALISASI

Sensitivitas terhadap Tinggi Kolom

Untuk mekanisme sidesway yang didominasi lentur kolom, perpindahan lateral secara pendekatan berbanding dengan H^3 . Tabel 6 memberikan rasio kekakuan dan perpindahan untuk variasi tinggi $\pm 20\%$. Nilai ini merupakan screening teoretis, bukan output tambahan SAP2000. Meskipun demikian, hubungan tersebut membantu memprioritaskan parameter yang perlu diuji pada simulasi parametrik.



Tabel 6. Screening sensitivitas tinggi kolom untuk respons lentur.

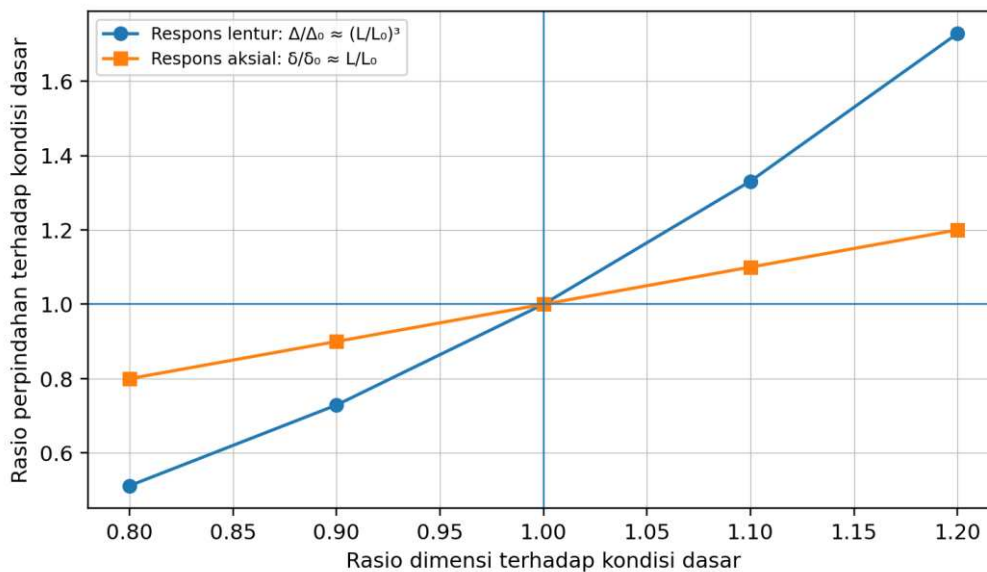
H/H ₀	k lateral/k ₀	Δ/Δ_0	Perubahan Δ
0.80	1.953	0.512	-48.8%
0.90	1.372	0.729	-27.1%
1.00	1.000	1.000	+0.0%
1.10	0.751	1.331	+33.1%
1.20	0.579	1.728	+72.8%

Penurunan tinggi 10% menurunkan perpindahan menjadi sekitar 72,9% dari kondisi dasar. Sebaliknya, kenaikan tinggi 10% meningkatkan perpindahan menjadi 133,1%. Kenaikan 20% menghasilkan rasio perpindahan 1,728. Dengan demikian, sensitivitas tinggi terhadap drift sekitar +3 pada kondisi ideal. Dalam model portal nyata, nilai aktual dapat berbeda karena deformasi aksial, kekakuan balok, kondisi tumpuan, dan efek P-Delta.

Sensitivitas terhadap Panjang Bentang

Lendutan balok dan rotasi simpul juga peka terhadap panjang bentang. Untuk balok dengan beban merata dan penampang tetap, lendutan karakteristik meningkat dengan pangkat empat panjang bentang, sedangkan komponen kekakuan elemen berbanding dengan L^{-3} . Dalam portal, rotasi simpul yang meningkat mengubah momen ujung kolom. Oleh karena itu, variasi bentang dapat menghasilkan sensitivitas momen yang lebih kompleks daripada variasi tinggi kolom [10], [22].

Sebagai screening konservatif untuk komponen frame, hubungan $\frac{\Delta}{\Delta_0} \approx \left(\frac{L}{L_0}\right)^3$ digunakan. Hasilnya sama dengan Tabel 6 untuk rasio panjang yang sama. Namun, untuk lendutan balok akibat beban merata yang nilainya tetap per satuan panjang, perubahan dapat mendekati pangkat empat atau lima tergantung apakah total beban ikut berubah. Pada simulasi SAP2000, dua jenis studi harus dipisahkan: beban intensitas tetap dan total beban tetap.



Gambar 7. Perbandingan sensitivitas perpindahan aksial dan lentur terhadap perubahan panjang.

Sensitivitas terhadap Momen Inersia dan Luas Penampang

Pada perilaku lentur linear, perpindahan berbanding terbalik dengan EI. Jika E tetap, perubahan I langsung mengubah kekakuan lentur. Penurunan I sebesar 20% meningkatkan deformasi menjadi $1/0,8 = 1,25$ kali kondisi dasar. Kenaikan I sebesar 20% menurunkan deformasi menjadi sekitar 0,833 kali kondisi dasar. Dampak terhadap momen internal bergantung pada derajat ketidakpastian statis; pada portal indeterminate, perubahan kekakuan relatif mengubah distribusi momen, bukan hanya deformasi [9], [14].

Tabel 7. Screening sensitivitas momen inersia terhadap deformasi lentur.

I/I_0	$k \ b/k_0$	Δ/Δ_0	Perubahan Δ
0.80	0.800	1.250	+25.0%
0.90	0.900	1.111	+11.1%
1.00	1.000	1.000	+0.0%
1.10	1.100	0.909	-9.1%
1.20	1.200	0.833	-16.7%

Luas penampang terutama memengaruhi pemendekan aksial dan kekakuan aksial. Dalam model dengan beban vertikal, pengurangan A meningkatkan pemendekan kolom dan dapat memperbesar efek P-Delta. Namun, apabila profil penampang diubah secara nyata, A dan I biasanya berubah secara bersamaan. Oleh sebab itu, studi praktis sebaiknya menggunakan daftar section SAP2000, bukan mengubah A dan I secara independen tanpa penampang fisik.

Sensitivitas terhadap Kondisi Batas

Tumpuan jepit-jepit menahan rotasi dasar kedua kolom sehingga memberikan kekakuan lateral terbesar dan momen dasar relatif tinggi. Ketika salah satu dasar dibuat sendi, sebagian momen dasar dilepaskan dan rotasi meningkat. Pada konfigurasi sendi-sendi, frame tetap dapat memiliki kekakuan lateral karena sambungan balok-kolom kaku, tetapi drift biasanya lebih besar dan distribusi momen berubah. Apabila release tambahan diterapkan pada sambungan atas, model dapat mendekati mekanisme.

Tabel 8. Pengaruh kualitatif kondisi batas terhadap respons portal.

Kondisi dasar	Kekakuan relatif	Momen dasar	Drift	Catatan
Jepit-jepit	Tertinggi	Tinggi pada kedua kolom	Terendah	Cocok untuk fondasi sangat kaku
Jepit-sendi	Menengah	Terkonsentrasi pada sisi jepit	Meningkat	Respons tidak simetris
Sendi-sendi	Lebih rendah	Mendekati nol di dasar	Lebih tinggi	Stabilitas bergantung frame action
Pegas rotasi	Kontinu	Bergantung K_θ	Bergantung K_θ	Representasi semi-rigid/fondasi

Parameter pegas rotasi dapat dinormalisasi terhadap EI/H . Nilai $K_\theta/(EI/H)$ yang sangat kecil mewakili sendi, sedangkan nilai yang sangat besar mendekati jepit. Kurva drift terhadap rasio tersebut umumnya menurun secara nonlinier dan kemudian mendatar. Titik transisi dapat digunakan untuk menentukan apakah peningkatan kekakuan fondasi atau sambungan masih efektif secara struktural.

Interaksi Parameter dan Prioritas Simulasi

Sensitivitas satu parameter tidak selalu dapat dijumlahkan secara linear. Sebagai contoh, peningkatan tinggi sekaligus penurunan I memperbesar drift melalui dua mekanisme yang saling menguatkan. Peningkatan gaya aksial tekan juga dapat memicu amplifikasi orde kedua. Oleh karena itu, setelah screening satu faktor, analisis dua faktor diperlukan untuk pasangan H-I, H- K_θ , dan L-I. Metode desain eksperimen atau response surface dapat digunakan apabila jumlah parameter bertambah [14], [17].

Tabel 9. Prioritas kombinasi parameter untuk simulasi SAP2000 lanjutan.

Prioritas	Pasangan parameter	Alasan
1	H dan I kolom	Pengaruh langsung terhadap kekakuan lateral H^3/EI
2	H dan K_θ dasar	Mengontrol sidesway dan momen dasar
3	L balok dan I balok	Mengontrol rotasi simpul dan momen balok
4	A kolom dan gaya aksial	Menentukan pemendekan dan potensi P-Delta
5	Pola beban dan tumpuan	Menentukan simetri respons dan redistribusi

PEMBAHASAN

Konsistensi Respons dengan Mekanika Portal

Pola diagram menunjukkan karakter frame kaku: momen tidak nol pada sambungan balok-kolom, momen dasar pada tumpuan, gaya aksial tekan pada kolom, dan sidesway akibat komponen beban horizontal atau asimetri. Secara kualitatif, pola ini konsisten dengan teori matriks kekakuan [8], [9]. Akan tetapi, konsistensi bentuk diagram tidak membuktikan kebenaran nilai absolut. Perbedaan gaya dan momen antara kolom kiri dan kanan dapat disebabkan oleh lokasi beban horizontal, kekangan berbeda, atau orientasi sumbu lokal. Apabila geometri dan beban seharusnya simetris, respons yang tidak simetris menjadi indikator bahwa salah satu input perlu diperiksa. Pemeriksaan mirror model atau pembalikan arah beban dapat digunakan untuk menguji simetri numerik.

Rotasi R2 yang terlihat pada gambar tetapi dilaporkan nol dalam tabel merupakan contoh penting masalah konsistensi data. Kesalahan dapat terjadi karena tabel berasal dari load case berbeda, joint berbeda, atau opsi output yang tidak sama. Dalam artikel ilmiah, setiap gambar dan tabel harus menyebut load case, step type, dan unit yang sama.

Interpretasi Drift dan Kelayakan Struktur

Pernyataan bahwa perpindahan 0,2022 m masih aman tidak dapat dipertahankan tanpa kriteria drift dan tinggi tingkat. Kelayakan drift harus dinilai sebagai rasio perpindahan terhadap tinggi dan dibandingkan dengan batas layanan yang sesuai. Selain itu, displacement scale pada visualisasi SAP2000 dapat memperbesar bentuk terdeformasi; bentuk gambar tidak boleh digunakan untuk mengukur deformasi tanpa membaca tabel nilai.

Jika tinggi kerja 3 m dan U1 benar 0,2022 m, drift 6,74% mengindikasikan fleksibilitas sangat tinggi dan analisis P-Delta menjadi penting. Jika U1 sebenarnya 0,2022 mm, drift menjadi 0,0067%. Kedua interpretasi berbeda seribu kali. Contoh ini memperlihatkan bahwa audit unit adalah bagian kritis dari kesimpulan, bukan sekadar perbaikan format. Untuk penilaian kapasitas, gaya dan momen harus dibandingkan dengan resistance penampang berdasarkan standar baja. AISC 360 dan Eurocode 3 mensyaratkan pemeriksaan interaksi aksial-lentur, stabilitas lokal dan global, serta faktor panjang efektif atau direct analysis. Penelitian ini belum memiliki section data sehingga rasio demand-capacity tidak dihitung [18], [25].

Implikasi untuk Struktur Kelautan dan Pembelajaran

Walaupun model berupa portal umum, prosedur yang sama relevan untuk bent frame, modul topside, support frame, dan submodel rangka pada fasilitas lepas pantai. Pada struktur kelautan, beban lingkungan, korosi, fatigue, dan kondisi fondasi menambah kompleksitas, tetapi kualitas hasil tetap dimulai dari audit geometri, unit, kekakuan, dan jalur beban [1], [2], [20]. Untuk pembelajaran, portal 2D efektif menjembatani perhitungan manual dan software. Mahasiswa dapat menghitung reaksi dan momen dengan metode slope-deflection atau matriks kekakuan, kemudian membandingkannya dengan SAP2000. Variasi satu parameter membantu memperlihatkan makna fisik EA, EI, release, dan support restraint. Pendekatan ini lebih edukatif daripada hanya melaporkan tangkapan layar output [7], [11]. Artikel revisi juga menekankan reproducibility. File model, tabel koordinat, section properties, load definitions, dan hasil export sebaiknya disimpan sebagai lampiran. Dengan demikian, pembaca dapat mengulang analisis, memeriksa unit, dan menguji skenario baru.

Rencana Validasi Numerik yang Direkomendasikan

Analisis mesh pada elemen frame tidak selalu memerlukan pembagian sangat rapat untuk respons linear, tetapi elemen perlu dibagi pada titik perubahan beban, sambungan, atau lokasi output penting. Untuk beban terdistribusi dan elemen prismatic, solusi frame dapat akurat dengan satu elemen per member; pembagian tambahan digunakan untuk menangkap bentuk diagram dan efek nonprismatic atau nonlinear [5], [21].

Tabel 10. Daftar pemeriksaan untuk validasi model SAP2000.

No.	Pemeriksaan	Kriteria lulus
1	Active units	Tercantum pada setiap tabel/gambar
2	Koordinat joint	Tinggi dan bentang sama dengan tabel metode
3	Section properties	A, I2, I3, J dan berat garis terdokumentasi
4	Beban	Total beban sesuai integrasi intensitas x panjang



No.	Pemeriksaan	Kriteria lulus
5	Reaksi	ΣF_x , ΣF_z , dan ΣM memenuhi keseimbangan
6	Release dan restraint	Tidak ada DOF bebas yang tidak disengaja
7	Mesh sensitivity	Perubahan output utama < 2-5%
8	P-Delta	Amplifikasi dilaporkan jika gaya aksial signifikan
9	Cross-check analitis	Reaksi dan respons sederhana searah dengan teori
10	Output consistency	Gambar, tabel, load case, dan unit identik

Keterbatasan Penelitian

Keterbatasan utama adalah tidak tersedianya file SAP2000 asli sehingga active units, koordinat, section properties, load pattern, dan restraint tidak dapat diverifikasi langsung. Rekonstruksi tinggi 3 m dan bentang 6 m merupakan asumsi kerja yang logis dari konteks, tetapi harus diganti apabila file model menunjukkan nilai berbeda. Analisis sensitivitas kuantitatif pada Bagian 5 merupakan screening berdasarkan hubungan elastik ternormalisasi. Nilai tersebut berguna untuk menjelaskan arah dan besarnya kecenderungan, tetapi bukan pengganti run parametrik SAP2000. Hasil numerik akhir harus diperoleh dengan mengubah parameter pada model terverifikasi dan menjaga parameter lain tetap konstan.

Penelitian belum mengevaluasi kapasitas penampang, buckling, sambungan, material nonlinier, efek orde kedua, imperfection, atau beban dinamik. Pada portal dengan drift besar atau gaya aksial signifikan, linear static analysis dapat meremehkan momen dan perpindahan. Analisis P-Delta dan direct analysis perlu dipertimbangkan [16], [18], [28]. Beban terdistribusi horizontal pada elemen belum didefinisikan lokasinya secara rinci. Untuk reproduksibilitas, artikel berikutnya perlu menyajikan skema arah sumbu global, lokasi beban, load case, dan kombinasi beban. Pemisahan beban vertikal dan horizontal juga diperlukan untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing terhadap gaya aksial, momen, dan drift.

KESIMPULAN

Hasil revisi menunjukkan bahwa pola respons portal secara kualitatif telah konsisten dengan perilaku *rigid frame*, yang ditandai oleh gaya aksial tekan pada kolom, terbentuknya momen pada sambungan dan dasar kolom, serta *sidesway* akibat beban horizontal atau ketidaksimetrian pembebanan. Namun, interpretasi besaran hasil analisis harus mempertimbangkan *active units*. Nilai mentah gaya sebesar 7086,87 dan -5874,94 tidak dapat langsung dinyatakan sebagai ribuan kN tanpa verifikasi satuan. Apabila model menggunakan sistem N-m, nilai tersebut masing-masing setara dengan sekitar 7,087 kN dan -5,875 kN, sedangkan momen 20673,05 setara dengan 20,673 kN·m. Demikian pula, perpindahan sebesar 0,2022 belum dapat dinyatakan memenuhi kriteria sebelum unit dan tinggi portal dipastikan. Jika satuannya meter dengan tinggi portal 3 m, nilai tersebut menghasilkan *drift* sekitar 6,74%, sehingga kekakuan struktur dan pengaruh *P-Delta* perlu diperiksa lebih lanjut.

Hasil *screening* sensitivitas menunjukkan bahwa tinggi kolom dan panjang bentang merupakan parameter yang berpengaruh signifikan terhadap respons struktur. Pada mekanisme lentur ideal, peningkatan panjang sebesar 10% dapat meningkatkan perpindahan sekitar 33,1%, sedangkan peningkatan 20% menghasilkan kenaikan sekitar 72,8%. Penurunan momen inersia sebesar 20% juga dapat meningkatkan deformasi sekitar 25%. Selain itu, kondisi tumpuan yang lebih fleksibel dapat mengurangi momen dasar tertentu, tetapi pada saat yang sama meningkatkan rotasi dan *drift*. Oleh karena itu, evaluasi sensitivitas tidak cukup didasarkan pada satu model dasar, tetapi harus dilengkapi dengan matriks skenario, indikator respons, dan ukuran sensitivitas yang konsisten. Sebelum hasil analisis digunakan sebagai dasar desain, file model SAP2000 (.sdb) perlu diverifikasi terhadap geometri, *section properties*, sistem satuan, pembebanan, *restraint*, *release*, reaksi tumpuan, rotasi, dan *load case*. Matriks variasi parameter yang telah disusun dapat digunakan sebagai dasar untuk *run* SAP2000 lanjutan guna mengonfirmasi hasil *screening* sensitivitas. Setelah tahap verifikasi tersebut terpenuhi, evaluasi kapasitas, stabilitas, deformasi, dan pengaruh nonlinier dapat dilakukan berdasarkan standar desain yang relevan.

REFERENSI

- [1] American Petroleum Institute, API RP 2A-WSD: Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms. Washington, DC, USA: API, 2007.



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

- [2] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Structures*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011.
- [3] S. L. Chan and P. P. T. Chui, *Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames*. Oxford, U.K.: Elsevier, 2000.
- [4] 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.
- [5] Computers and Structures, Inc., *SAP2000 Analysis Reference Manual*, Version 22. Berkeley, CA, USA: CSI, 2020.
- [6] J. M. Gere and B. J. Goodno, *Mechanics of Materials*, 8th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2012.
- [7] R. R. Husaini, M. Yazid, A. D. Islami, T. J. Gunawan, and M. D. Wahyudi, "Analisis struktur rangka batang 2D dengan metode matriks kekakuan," *Jurnal Rab Construction Research*, vol. 8, no. 2, pp. 322-338, 2023.
- A. Kassimali, *Matrix Analysis of Structures*, 2nd ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2012.
- [8] W. McGuire, R. H. Gallagher, and R. D. Ziemian, *Matrix Structural Analysis*, 2nd ed. New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [9] S. P. Timoshenko and D. H. Young, *Elements of Strength of Materials*. Princeton, NJ, USA: D. Van Nostrand, 1965.
- [10] S. T. Zulfikar, *Dasar-Dasar Metode Elemen Hingga untuk Teknik Mesin*. Ambarawa, Indonesia: Universitas Muhammadiyah Ambarawa, 2019.
- [11] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
- [12] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2013.
- [13] T. H. G. Megson, *Structural and Stress Analysis*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [14] Y. C. Fung and P. Tong, *Classical and Computational Solid Mechanics*. Singapore: World Scientific, 2001.
- [15] W. F. Chen and E. M. Lui, *Structural Stability: Theory and Implementation*. New York, NY, USA: Elsevier, 1987.
- [16] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*, 5th ed. Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [17] American Institute of Steel Construction, *ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL, USA: AISC, 2022.
- [18] American Society of Civil Engineers, *ASCE/SEI 7-22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA, USA: ASCE, 2022.
- [19] International Organization for Standardization, *ISO 19902:2020, Petroleum and Natural Gas Industries Fixed Steel Offshore Structures*. Geneva, Switzerland: ISO, 2020.
- [20] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures*, 2nd ed. Watertown, MA, USA: Klaus-Jürgen Bathe, 2014.
- [21] R. C. Hibbeler, *Structural Analysis*, 10th ed. Hoboken, NJ, USA: Pearson, 2018.
- [22] R. W. Clough and J. Penzien, *Dynamics of Structures*, 3rd ed. Berkeley, CA, USA: Computers & Structures, Inc., 2003.
- A. K. Chopra, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 5th ed. Boston, MA, USA: Pearson, 2017.
- [23] European Committee for Standardization, *EN 1993-1-1:2005+A1:2014, Eurocode 3 Design of Steel Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. Brussels, Belgium: CEN, 2014.
- [24] Computers and Structures, Inc., *SAP2000 Verification Manual*, Version 22. Berkeley, CA, USA: CSI, 2020.
- [25] S. P. Timoshenko and J. M. Gere, *Theory of Elastic Stability*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1961.
- [26] R. D. Ziemian, Ed., *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 6th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2010.