

Studi Variasi Faktor Beban terhadap Keandalan Struktur Balok dengan Pendekatan *Limit State*

Wachid Hasyim^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wiralodra, Indramayu

*E-mail: wachidhasyim@unwir.ac.id

ABSTRAK

Keandalan struktur baja sangat dipengaruhi oleh pendekatan beban rencana dalam perancangan, terutama pada elemen balok yang berperan penting dalam menahan beban lentur. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi faktor beban dari tiga standar desain struktural, yaitu SNI, Eurocode, dan JCSS, terhadap keandalan balok baja dengan profil IWF. Metode yang digunakan melibatkan pemodelan struktur portal dua dimensi menggunakan perangkat lunak SAP2000, dilanjutkan dengan analisis probabilistik menggunakan simulasi Monte Carlo untuk mendapatkan nilai P_f dan β . Tiga jenis profil balok baja IWF (200×100, 300×150, dan 400×200) diuji untuk mengetahui nilai probabilitas kegagalan (P_f) dan indeks keandalan (β) berdasarkan faktor beban yang variatif. Hasil menunjukkan bahwa Eurocode menghasilkan nilai momen ultimit tertinggi, sedangkan SNI menghasilkan nilai P_f paling kecil. Peningkatan dimensi profil balok juga secara signifikan menurunkan nilai P_f dan meningkatkan nilai β . Kesimpulannya, keandalan balok baja sangat dipengaruhi oleh standar pembebanan yang digunakan serta dimensi profil. Studi ini memberikan kontribusi penting dalam mendukung pemilihan desain struktur baja yang efisien sekaligus andal.

Kata kunci: Analisis probabilistik, balok baja, faktor beban, fungsi limit state, keandalan struktur

ABSTRACT

The reliability of steel structures is highly influenced by the approach to design loads, particularly in beam elements that play a key role in resisting bending forces. This study aims to evaluate the impact of varying load factors from three structural design standards—SNI, Eurocode, and JCSS—on the reliability of steel beams with IWF profiles. The method involves modeling a two-dimensional portal frame using SAP2000 software, followed by probabilistic analysis based on the limit state function approach using the equation $G=R-S$. Three types of IWF steel beam profiles (200×100, 300×150, and 400×200) were analyzed to assess the influence of cross-sectional dimensions on failure probability (P_f) and reliability index (β). The results show that the Eurocode yields the highest ultimate moment values, while SNI produces the lowest P_f values. Increasing the beam profile dimensions significantly reduces P_f and increases β . In conclusion, the reliability of steel beams is strongly affected by the applied load standards and the beam profile dimensions. This study provides important insights to support the selection of efficient and reliable steel structural designs, particularly for light to medium-scale buildings.

Keywords: Load factor, limit state function, probabilistic analysis, steel beam, structural reliability.

1. PENDAHULUAN

Dalam rekayasa struktur, desain berbasis *limit state* telah menjadi pendekatan utama dalam menentukan keamanan dan kinerja elemen struktur, termasuk balok. *Limit state* mempertimbangkan dua kondisi kegagalan utama, yaitu *ultimate limit state* (ULS) dan *serviceability limit state* (SLS). ULS berfokus pada kegagalan kekuatan, sedangkan SLS berkaitan dengan fungsi struktur sehari-hari.

Faktor beban (*load factor* atau γ) berperan penting dalam perhitungan *limit state*. Variasi faktor ini memengaruhi probabilitas kegagalan (P_f) dan indeks keandalan (β) balok. Oleh karena itu, perlu dilakukan studi kuantitatif untuk mengetahui pengaruh variasi faktor beban terhadap keandalan struktur balok secara komprehensif.

Desain struktur berbasis *limit state* pada dasarnya menggabungkan konsep deterministik dan probabilistik secara bersamaan. Faktor beban (*load factor*) digunakan untuk mengantisipasi ketidakpastian variasi beban aktual yang bekerja selama umur struktur, sementara faktor reduksi kekuatan (*strength reduction factor*) mempertimbangkan variabilitas kualitas material, metode konstruksi, dan ketidakpastian perhitungan. Dalam praktiknya, kombinasi antara faktor beban dan faktor reduksi kekuatan diatur dalam peraturan desain seperti SNI 2847, Eurocode, maupun JCSS. Meskipun standar tersebut sudah menetapkan nilai faktor beban yang dianggap aman, perkembangan pendekatan probabilistik mendorong perlunya evaluasi lebih mendalam. Dengan melakukan studi variasi faktor beban secara sistematis, diharapkan dapat diperoleh pemahaman kuantitatif mengenai sensitivitas

keandalan struktur balok, sehingga desain yang dihasilkan lebih rasional, efisien, dan memenuhi target tingkat keandalan yang diinginkan.

Beberapa penelitian tentang keandalan struktur balok dilakukan oleh beberapa penelitian. Keandalan struktur balok di bawah berbagai variasi faktor beban telah menjadi fokus utama dalam riset rekayasa struktur, terutama ketika pendekatan *limit state* (batas keadaan) digunakan. Kariyawasam et al. (1997) menekankan pentingnya kalibrasi faktor tahanan (*resistance factor*) dan faktor beban dalam desain beton bertulang, yang secara langsung mempengaruhi penilaian keandalan struktur. Penelitian mereka menegaskan perlunya optimasi faktor-faktor ini untuk memastikan keselamatan dan kinerja, khususnya pada struktur beton yang menerima pembebanan yang bervariasi. Selanjutnya, Assakkaf et al. (2002) turut memberikan kontribusi dengan menganalisis batas kekuatan panel kapal, menunjukkan pentingnya pemahaman berbagai mode kegagalan dan penerapan model prediksi kekuatan. Biondini et al. (2004) memperkenalkan kerangka analisis keandalan *fuzzy* yang memodelkan ketidakpastian melalui rentang nilai, bukan parameter tetap. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi keandalan yang lebih menyeluruh, karena mencakup variabilitas faktor beban dan sifat material secara alami. Metodologi ini sangat relevan saat mempelajari variasi faktor beban, karena memungkinkan penilaian probabilistik yang lebih mencerminkan kondisi nyata.

El-Reedy (2012) memberikan perspektif luas mengenai keandalan struktur beton bertulang, dengan menekankan integrasi metode probabilistik ke dalam pendekatan *limit state*. Selain itu, Soubra & Mao (2012) menunjukkan penerapan analisis probabilistik pada batas keadaan ultimit fondasi di bawah beban miring, menggunakan faktor keamanan yang diperoleh melalui teknik reduksi kekuatan. Selanjutnya, Huang et al. (2012) berfokus pada kalibrasi metode LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) untuk dinding tanah bertulang baja, dengan kerangka berbasis teori keandalan yang ketat dan dapat diadaptasi untuk elemen struktur lain seperti balok. Proses kalibrasi tersebut menegaskan pengaruh faktor beban dan tahanan terhadap indeks keandalan, sehingga menekankan pentingnya penentuan faktor secara tepat dalam pendekatan *limit state*.

Studi oleh Rakoczy et al. (2016) dan Bhowmick & Grondin (2016) memperluas analisis keandalan ke aspek kelelahan (*fatigue*) dan tulangan baja. Model kelelahan Rakoczy menggunakan kurva S-N untuk memperkirakan umur sisa struktur di bawah kondisi beban variabel, menunjukkan bagaimana variasi faktor beban mempengaruhi keandalan kelelahan seiring waktu. Bhowmick & Grondin (2016) memanfaatkan model elemen hingga untuk menyelidiki pengaruh parameter tulangan terhadap kekuatan kolom baja, secara tidak langsung menyoroti bagaimana faktor beban dan variabilitas material mempengaruhi keandalan struktur. Dalam konteks beban dinamis dan lingkungan, Lee & Kim (2016) menganalisis keandalan seismik rangka turbin angin lepas pantai dengan menggunakan batas keadaan tegangan, menerapkan teknik FORM (*First Order Reliability Method*) dan simulasi. Pendekatan ini menunjukkan sensitivitas hasil keandalan terhadap faktor beban yang berkaitan dengan kejadian seismik, menekankan pentingnya pemodelan beban yang akurat. Akhirnya, Anoop & Rao (2016) mengeksplorasi penilaian kondisi girder beton yang mengalami korosi dengan menggunakan metode *fuzzy state*, yang menggabungkan ketidakpastian kondisi beban dan material.

Secara keseluruhan, berbagai studi ini menegaskan bahwa variasi faktor beban adalah penentu kritis keandalan balok dan elemen struktur lain dalam kerangka *limit state*. Penerapan metode probabilistik meningkatkan ketahanan evaluasi keandalan, dengan mengakomodasi ketidakpastian yang melekat pada pembebanan, sifat material, dan kondisi lingkungan.

Meskipun penelitian mengenai keandalan struktur balok dengan pendekatan *limit state* telah banyak dilakukan, sebagian besar studi sebelumnya lebih berfokus pada evaluasi parameter material atau variasi dimensi penampang sebagai faktor dominan yang memengaruhi kapasitas struktur. Sementara itu, pengaruh variasi faktor beban secara spesifik, terutama dalam konteks perbandingan antar peraturan desain seperti SNI, Eurocode, dan JCSS, masih relatif terbatas dibahas secara kuantitatif. Selain itu, banyak kajian yang hanya menyajikan nilai deterministik tanpa disertai simulasi probabilistik untuk menilai probabilitas kegagalan (P_f) dan indeks keandalan (β). Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan riset yang penting untuk dijematani, agar perancangan struktur balok tidak hanya mempertimbangkan ketentuan normatif, tetapi juga berdasarkan pemahaman mendalam terhadap pengaruh variasi faktor beban terhadap tingkat keandalan struktur secara statistik.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi faktor beban terhadap keandalan struktur balok baja dengan menggunakan pendekatan *limit state*. Secara khusus, penelitian ini menghitung dan membandingkan nilai indeks keandalan (β) serta probabilitas kegagalan (P_f) pada berbagai kombinasi faktor beban yang umum digunakan dalam peraturan desain seperti SNI, Eurocode, dan JCSS. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan teknis dalam evaluasi atau penyempurnaan kebijakan penetapan faktor beban dalam standar desain struktur di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

Perencanaan berbasis teori kondisi batas (*limit state*) merupakan pendekatan yang didasarkan pada dua kondisi batas utama, yaitu *ultimate limit state* (ULS) dan *serviceability limit state* (SLS). ULS berkaitan dengan kondisi kegagalan struktur secara total, misalnya keruntuhan akibat beban maksimum, sedangkan SLS berhubungan dengan fungsi pelayanan struktur seperti defleksi berlebihan atau retak yang mengganggu estetika. Dalam metode ini, kapasitas nominal struktur dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan (*strength reduction factor* atau ϕ) untuk mempertimbangkan ketidakpastian dalam material dan pengerjaan. Sementara itu, beban kerja dikalikan dengan faktor beban (*load factor* atau γ) untuk mengantisipasi variabilitas beban selama masa layan struktur. Pendekatan *limit state* bertujuan memastikan struktur memiliki tingkat keandalan yang memadai terhadap keruntuhan maupun gangguan fungsi, dengan memadukan pertimbangan keamanan, kenyamanan, dan efisiensi penggunaan material. Desain berbasis *limit state* bertujuan memastikan struktur memenuhi kriteria kekuatan (ULS) dan fungsi (SLS). Kekuatan nominal dikalikan faktor reduksi (ϕ), sedangkan beban dikalikan faktor beban (γ).

$$G = \phi \cdot R_n - \sum \gamma_i \cdot Q_i \quad (1)$$

dengan G = fungsi limit state, ϕ = faktor reduksi kekuatan, R_n = kapasitas nominal struktur, γ_i = faktor beban, dan Q_i = jenis beban.

Apabila nilai G lebih besar dari nol, struktur dianggap aman karena kapasitasnya melebihi beban terfaktor. Sebaliknya, jika G kurang dari atau sama dengan nol, maka struktur berada dalam kondisi gagal atau mendekati batas kegagalan. Persamaan ini menjadi dasar perhitungan probabilitas kegagalan dan indeks keandalan, karena memadukan ketidakpastian dalam kekuatan dan beban secara sistematis dalam satu kerangka analisis.

Salah satu bentuk fungsi *limit state* yang digunakan dalam desain balok beton bertulang dengan memisahkan antara beban mati dan hidup serta faktor-faktornya dihitung menggunakan persamaan 2.

$$G = \phi \cdot R_n - (\gamma_D \cdot D + \gamma_L \cdot L) \quad (2)$$

dengan ϕ = faktor reduksi kekuatan, R_n = kapasitas nominal lentur balok, γ_D = faktor beban mati, γ_L = faktor beban hidup.

Faktor Beban dalam Peraturan Desain

Faktor beban (*load factor* atau γ) merupakan koefisien pengali yang digunakan untuk menaikkan nilai beban rencana agar perhitungan desain struktur mempertimbangkan ketidakpastian variasi beban selama masa layan. Setiap peraturan desain memiliki ketentuan nilai γ yang berbeda, bergantung pada filosofi keselamatan dan tingkat konservatisme yang dianut. Misalnya, dalam SNI 2847, faktor beban untuk beban mati umumnya bernilai 1,2 dan beban hidup 1,6. Sementara itu, Eurocode menetapkan faktor beban sekitar 1,35 untuk beban mati dan 1,5 untuk beban hidup. Adapun JCSS mengacu pada nilai γ sekitar 1,3–1,5, yang didasarkan pada analisis probabilistik dan kajian statistik beban aktual.

Tabel 1. Nilai faktor beban

Peraturan	γ_D (Beban Mati)	γ_L (Beban Hidup)
SNI 2847	1.2	1.6
Eurocode	1.35	1.5
JCSS	1.3	1.5

Penggunaan faktor beban yang lebih besar memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi, namun berdampak pada peningkatan dimensi atau jumlah tulangan sehingga desain menjadi lebih konservatif. Oleh karena itu, pemilihan faktor beban harus mempertimbangkan keseimbangan antara keamanan, efisiensi biaya, dan tingkat keandalan yang ditargetkan dalam desain struktur.

Faktor Reduksi Kekuatan (ϕ)

Faktor reduksi kekuatan, yang dilambangkan dengan simbol ϕ , adalah koefisien yang digunakan untuk menurunkan nilai kapasitas nominal elemen struktur guna mengantisipasi ketidakpastian dalam mutu material, ketelitian pelaksanaan konstruksi, variasi dimensi penampang, serta model perhitungan yang digunakan. Dalam praktik desain, nilai ϕ ditetapkan berbeda-beda tergantung jenis gaya dalam yang ditinjau. Sebagai contoh, pada desain balok beton bertulang berdasarkan SNI 2847, faktor reduksi kekuatan untuk lentur umumnya sebesar 0,9, sedangkan untuk geser atau torsi bisa lebih rendah, sekitar 0,75. Penggunaan faktor ini membuat hasil perhitungan kapasitas desain menjadi lebih konservatif dan aman, karena secara praktis kapasitas yang digunakan bukan kapasitas teoritis maksimum, melainkan kapasitas yang telah dikoreksi berdasarkan potensi ketidakpastian. Pemahaman terhadap nilai ϕ sangat penting agar perancang dapat memastikan bahwa struktur yang didesain tetap memenuhi tingkat keandalan yang diharapkan tanpa mengorbankan efisiensi penggunaan material.

Indeks Keandalan (β) dan Probabilitas Kegagalan (Pf)

Model probabilistik dalam perhitungan keandalan bertujuan memasukkan unsur ketidakpastian dalam variabel-variabel yang digunakan pada fungsi *limit state*. Dalam pendekatan deterministik, nilai kapasitas dan beban hanya dianggap sebagai angka tetap. Namun, pada kenyataannya, setiap variabel memiliki distribusi statistik tertentu akibat variasi mutu material, perubahan beban selama umur layan, serta toleransi pelaksanaan. Oleh karena itu, dalam analisis probabilistik, kapasitas R_n dan beban (D dan L) diperlakukan sebagai variabel acak yang memiliki rata-rata (μ) dan simpangan baku (σ).

Distribusi probabilitas yang digunakan dalam analisis ini adalah distribusi normal. Asumsi distribusi data yang digunakan pada analisis berupa distribusi normal baik beban mati maupun hidup. Dengan demikian, simulasi Monte Carlo dapat dilakukan untuk menghitung peluang nilai fungsi *limit state* lebih kecil atau sama dengan nol, yang menjadi dasar estimasi probabilitas kegagalan (Pf) dan indeks keandalan (β).

Pendekatan probabilistik berbasis fungsi *limit state* memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap kinerja struktur dibandingkan metode deterministik murni. Selain itu, metode ini memungkinkan dilakukan evaluasi sensitivitas, yaitu untuk mengetahui variabel mana yang paling memengaruhi tingkat keandalan struktur. Pemahaman yang baik mengenai fungsi *limit state* dan model probabilistik menjadi kunci dalam pengembangan desain struktur yang lebih rasional, efisien, dan sesuai dengan tuntutan keselamatan modern.

Selanjutnya, Indeks keandalan yang dilambangkan dengan simbol β adalah parameter statistik yang digunakan untuk mengukur tingkat keamanan atau keandalan suatu komponen struktur terhadap kegagalan. Secara sederhana, β menggambarkan jarak rata-rata fungsi *limit state* terhadap titik batas kegagalan dalam satuan standar deviasi. Semakin besar nilai β , maka struktur semakin andal karena probabilitas terjadinya kegagalan semakin kecil. Sebaliknya, semakin kecil nilai keandalan maka nilai probabilitas kegagalan semakin besar, sehingga hal tersebut menjadi perhatian dan pertimbangan keamanan pada desain struktur.

Probabilitas kegagalan, yang dinyatakan dengan simbol Pf, adalah peluang bahwa kapasitas struktur yang tersedia lebih kecil atau sama dengan beban yang bekerja. Nilai Pf secara matematis berkaitan langsung dengan β melalui fungsi distribusi normal kumulatif, yaitu:

$$Pf = \Phi(-\beta) \quad (3)$$

dengan Φ = fungsi distribusi normal standar, dan β = indeks keandalan.

Sebagai contoh, apabila nilai β sebesar 3,5, maka probabilitas kegagalannya sekitar 0,0002 atau 0,02%. Dengan demikian, sebanyak 10.000 struktur serupa, secara statistik hanya sekitar 2 yang berpotensi gagal. Berdasarkan hasil tersebut, semakin tinggi nilai β akan menghasilkan nilai probabilitas kegagalan yang rendah, meskipun memiliki konsekuensi struktur yang mahal.

Dalam peraturan desain, nilai β target biasanya sudah ditetapkan berdasarkan konsekuensi kegagalan dan fungsi struktur. Misalnya, untuk bangunan biasa, β target bisa sekitar 3,8–4,0, sedangkan untuk struktur penting seperti jembatan atau gedung evakuasi darurat, β yang diinginkan lebih tinggi, bisa mencapai 4,5 atau lebih. Penetapan nilai β target ini merupakan hasil kompromi antara tingkat keselamatan dan biaya konstruksi yang layak.

Teknik Analisis Data

Jenis penelitian yang digunakan berupa deskriptif numerik di mana digunakan nilai faktor beban dari beberapa standar seperti SNI, Eurocode, dan JCSS. Nilai faktor beban yang digunakan akan diukur tingkat keandalannya pada struktur di mana beban tersebut bekerja pada sebuah balok beton dengan nilai kapasitas lentur sesuai hasil desain balok. Pendekatan analisis yang digunakan berupa analisis dengan simulasi *importance sampling* (IS) di mana probabilitas kegagalan struktur diukur pada fungsi kinerja $G = R - S$. Fungsi kinerja struktur yang akan dianalisis lebih detail seperti yang disebutkan pada persamaan 3, di mana R merepresentasikan tahanan atau kapasitas (ϕR_n) dan S berupa beban ($\gamma D.D - \gamma L.L$).

Adapun tahapan analisis data dilakukan dengan beberapa langkah berikut:

1. Menentukan nilai faktor beban dengan besaran sesuai standar SNI, Eurocode, dan JCSS pada model struktur portal baja yang dianalisis menggunakan *software* SAP 2000 versi 14.
2. Menentukan nilai kapasitas lentur balok baja *rafter*.
3. Menentukan parameter statistik tahanan dan beban sesuai dengan distribusi data yang diasumsikan.
4. Melakukan simulasi *importance sampling* sebanyak 1.000 kali dengan memberikan pengali bobot sebesar 1.6 dan 0.4 untuk masing-masing beban dan tahanan. Selain itu, fungsi kinerja struktur yang diperhitungkan sesuai dengan persamaan 3.
5. Mengukur nilai probabilitas kegagalan (Pf) dan indeks keandalan (β) hasil simulasi *importance sampling* dan menginterpretasikannya.

Adapun parameter statistik dari tahanan dan beban pada balok baja, yaitu dengan nilai koefisien variasi (COV) untuk masing-masing tahanan dan beban sebesar 0.13 dan 0.54.

Balok baja yang dianalisis keandalannya berupa balok dengan dimensi dan properti material seperti pada tabel 1. Selain itu, digunakan profil baja dengan kuat mutu BJ-37 dengan nilai kuat leleh sebesar 240 MPa dan kuat tarik sebesar 370 MPa (Badan Standarisasi Nasional, 2002).

Tabel 2. Properti balok baja

No	Balok	Dimensi		Modulus plastis (Z_x)	Kuat leleh (f_y)
		b (mm)	d (mm)	(mm ³)	(Mpa)
1	IWF 200 x 100	200	100	184000	370
2	IWF 300 x 150	300	150	481000	370
3	IWF 400 x 200	400	200	1190000	370

Berat struktur untuk perhitungan beban mati yang bersumber dari berat komponen struktur dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 3. Pembebanan mati

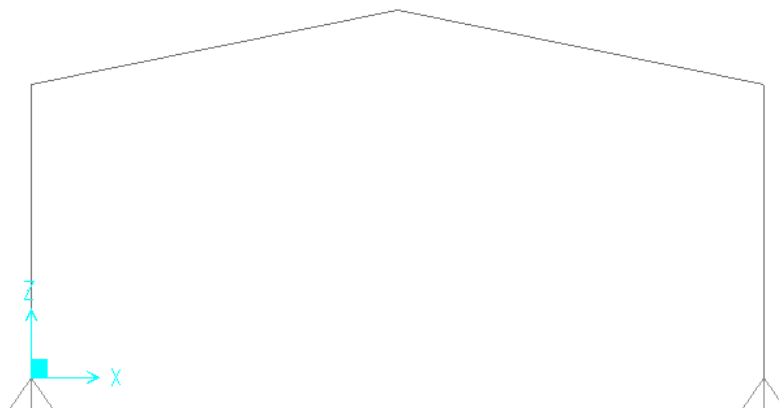
No	Jenis Beban Mati	Beban Mati (kg/m ²)
1	Berat Gording + sambungan (asumsi)	11
2	Berat Penggantung	7
3	Berat Plafond	11
4	Berat Waterproof	10
5	Berat Instalasi ME	25
Total (qd)		64

Adapun beban hidup pada struktur portal baja berupa beban hidup orang sesuai yang ditentukan dalam SNI 1727: 2020 (Badan Standarisasi Nasional, 2020), yaitu sebesar 100 kg/m².

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis

Analisis faktor beban yang bekerja pada komponen struktur balok baja diawali dengan melakukan analisis pada model struktur. Adapun model berupa struktur portal baja dengan kolom dan *rafter* dengan bentangan sepanjang 12 meter, sudut kemiringan atap sebesar 14° dan tinggi total sebesar 6 meter. Adapun model struktur yang dianalisis menggunakan *software* SAP 2000 versi 14 dapat dilihat pada gambar 1. Selanjutnya, model struktur dihitung dengan memperhatikan beberapa parameter struktur, di mana mutu baja yang digunakan berupa BJ-37.



Gambar 1. Model struktur portal baja

Berdasarkan hasil analisis struktur menggunakan *software* SAP 2000, didapatkan beberapa nilai gaya dalam struktur. Adapun nilai gaya dalam ultimit (M_u) maksimal pada balok *rafter* struktur portal dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Momen ultimit balok *rafter*

No	Standar	Kombinasi	Momen ultimit (kgm)
1	SNI	1.2 D + 1.6 L	894.61
2	EC	1.35 D + 1.5 L	920.34
3	JCSS	1.3 D + 1.5 L	902.19

Nilai probabilitas kegagalan (Pf) dan indeks keandalan (β) dari variasi faktor beban dari masing-masing standar pada balok IWF 200x100 yang dihitung menggunakan persamaan 3, dapat dilihat pada tabel 5 berikut.

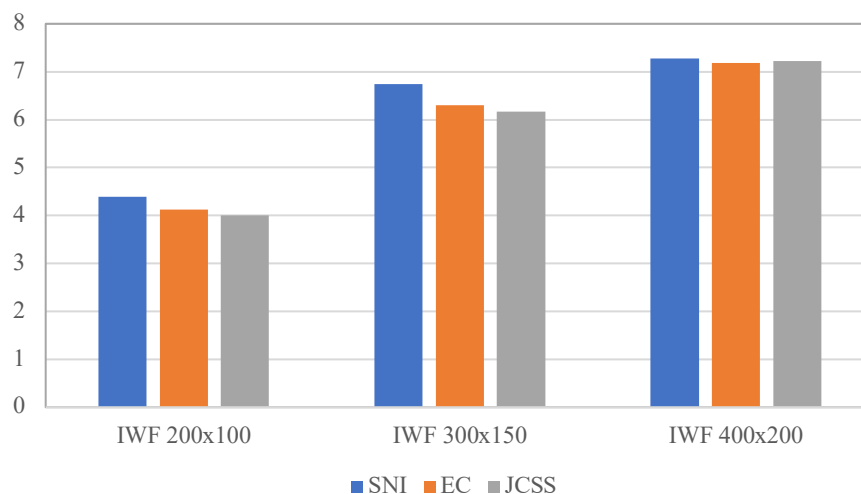
Tabel 5. Nilai Pf

No	Profil	Kombinasi	Pf
1	IWF 200x100	SNI	$5.69 \cdot 10^{-6}$
2		EC	$1.92 \cdot 10^{-5}$
3		JCSS	$3.16 \cdot 10^{-5}$
4	IWF 300x150	SNI	$7.88 \cdot 10^{-12}$
5		EC	$6.44 \cdot 10^{-11}$
6		JCSS	$3.34 \cdot 10^{-10}$
7	IWF 400x200	SNI	$1.64 \cdot 10^{-13}$
8		EC	$3.36 \cdot 10^{-13}$
9		JCSS	$2.69 \cdot 10^{-13}$

Berdasarkan hasil analisis, probabilitas kegagalan (Pf) yang didapatkan menunjukkan tingkat keandalan dari tiga jenis profil balok baja tipe IWF, yaitu IWF 200x100, IWF 300x150, dan IWF 400x200. Adapun evaluasi nilai Pf berdasarkan pada tiga standar desain struktural, yaitu SNI, Eurocode (EC), dan JCSS. Dari hasil analisis pula, tampak bahwa semakin besar dimensi profil balok, maka nilai probabilitas kegagalannya semakin kecil. Hal tersebut dapat diperhatikan pada profil IWF 200x100 yang memiliki nilai Pf berkisar antara $5,69 \times 10^{-6}$ hingga $3,16 \times 10^{-5}$, sementara profil IWF 400x200 menunjukkan nilai Pf yang sangat kecil, yaitu di bawah 3×10^{-13} . Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan dimensi profil secara signifikan meningkatkan kapasitas nominal balok, sehingga memperkecil risiko kegagalan akibat pembebanan.

Selanjutnya, apabila dilakukan perbandingan antar standar, maka SNI menghasilkan nilai probabilitas kegagalan paling kecil di setiap profil, disusul oleh Eurocode, lalu JCSS. Pola ini konsisten dan menunjukkan bahwa standar JCSS cenderung lebih konservatif dalam pendekatan terhadap ketidakpastian beban maupun kapasitas, sementara SNI tampak lebih optimis dalam menilai keandalan struktur. Meskipun demikian, ketiga standar masih memberikan nilai Pf yang berada dalam batas yang sangat aman untuk desain struktur, bahkan jauh di bawah ambang umum 10^{-6} yang sering dijadikan batas minimum keandalan dalam desain struktur konvensional.

Adapun nilai indeks keandalan dari masing-masing balok baja dengan faktor beban dari beberapa standar desain, dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Nilai β tiga standar desain

Grafik batang di atas menunjukkan perbandingan indeks keandalan (β) dari tiga jenis profil balok baja tipe IWF, yaitu IWF 200x100, IWF 300x150, dan IWF 400x200, berdasarkan tiga standar desain struktural: SNI, Eurocode

(EC), dan JCSS. Indeks keandalan (β) yang merupakan parameter statistik yang mencerminkan seberapa jauh jarak antara kapasitas struktur dan beban dalam domain probabilistik menunjukkan bahwa semakin besar nilai β , maka semakin kecil kemungkinan kegagalan dan semakin tinggi keandalan struktur.

Dari grafik tersebut dapat diamati bahwa nilai β meningkat seiring bertambahnya ukuran profil balok. Pada profil terkecil, IWF 200×100, nilai β masih berada di kisaran 4,0–4,5, yang menunjukkan tingkat keandalan yang masih baik namun relatif lebih rendah dibandingkan dua profil lainnya. Sementara itu, profil IWF 300×150 menunjukkan peningkatan nilai β hingga kisaran 6,2–6,8, dan profil IWF 400×200 bahkan mencapai nilai β di atas 7,0 untuk semua standar. Hal tersebut mengindikasikan bahwa balok memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi.

Pembahasan

Analisis faktor beban pada struktur balok baja dilakukan dengan menggunakan model struktur portal baja yang terdiri dari kolom dan *rafter* dengan bentang 12 meter dan sudut kemiringan atap 14°. Model ini dianalisis menggunakan perangkat lunak SAP 2000 versi 14 dengan material baja BJ-37. Fokus utama dari analisis ini adalah untuk mengetahui besarnya momen ultimit yang bekerja pada balok *rafter* akibat kombinasi beban yang berbeda sesuai dengan standar desain struktural, yaitu SNI, Eurocode (EC), dan JCSS. Hasil perhitungan menunjukkan variasi nilai momen ultimit (M_u), dengan nilai tertinggi dicapai oleh kombinasi beban menurut Eurocode sebesar 920,34 kgm.

Dari segi probabilitas kegagalan (P_f), diperoleh hasil yang sangat menarik. Tabel yang disajikan memperlihatkan bahwa semakin besar dimensi profil balok IWF, maka nilai probabilitas kegagalan semakin kecil. Misalnya, profil IWF 200×100 memiliki nilai P_f antara $5,69 \times 10^{-6}$ hingga $3,16 \times 10^{-5}$, sementara profil IWF 400×200 menunjukkan nilai P_f yang sangat kecil, yakni di bawah 3×10^{-13} . Pola ini mengindikasikan bahwa peningkatan ukuran profil secara signifikan memperbesar kapasitas nominal balok sehingga meningkatkan keandalan struktur terhadap beban yang diterima.

Dari segi perbandingan antar standar desain, SNI memberikan hasil probabilitas kegagalan paling kecil pada setiap jenis profil dibandingkan dengan Eurocode dan JCSS. Hal tersebut menunjukkan bahwa SNI menggunakan pendekatan yang lebih optimis terhadap penilaian keandalan struktur. Sebaliknya, standar JCSS tampak lebih konservatif, tercermin dari nilai P_f yang relatif lebih tinggi. Meskipun demikian, semua nilai P_f yang diperoleh dari ketiga standar tetap berada pada ambang aman. Dengan demikian, nilai P_f desain struktural tersebut menunjukkan bahwa desain balok dengan ketiga standar tersebut secara umum aman dari kemungkinan kegagalan.

Selanjutnya, indeks keandalan (β) dari masing-masing profil balok baja menunjukkan kecenderungan yang sama dengan nilai P_f . Indeks β meningkat seiring dengan peningkatan ukuran profil. Nilai β untuk profil IWF 200×100 berada di kisaran 4,0–4,5, sedangkan profil IWF 300×150 menunjukkan peningkatan ke kisaran 6,2–6,8. Bahkan, profil terbesar, yaitu IWF 400×200, memiliki nilai β di atas 7,0 untuk semua standar. Nilai ini menggambarkan bahwa struktur balok nilai keandalan tinggi, sehingga kemungkinan kegagalan sangat kecil. Dengan kata lain, semakin besar nilai β , maka struktur semakin andal dan aman digunakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis keandalan struktur balok baja terhadap variasi faktor beban dari tiga standar desain (SNI, Eurocode, dan JCSS), dapat disimpulkan bahwa pendekatan pembebanan memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai momen ultimit, probabilitas kegagalan (P_f), dan indeks keandalan (β). Eurocode menghasilkan nilai momen ultimit terbesar, sedangkan SNI memberikan nilai probabilitas kegagalan paling rendah, menunjukkan pendekatan yang lebih optimis terhadap keandalan struktur. Sementara itu, JCSS menunjukkan pendekatan yang paling konservatif. Peningkatan dimensi profil balok tipe IWF secara konsisten meningkatkan keandalan struktur, ditandai dengan menurunnya nilai P_f hingga mendekati nol dan meningkatnya nilai β hingga melampaui angka 7,0. Hal ini menegaskan bahwa ukuran profil balok memiliki kontribusi besar dalam memperbesar kapasitas lentur dan mereduksi kemungkinan kegagalan. Dengan demikian, pemilihan standar pembebanan dan spesifikasi profil balok harus disesuaikan dengan kebutuhan kinerja struktur dan tingkat keamanan yang diinginkan. Hasil studi ini memberikan dasar pertimbangan yang kuat untuk desain struktur baja yang tidak hanya kuat, tetapi juga andal dalam menghadapi ketidakpastian beban rencana.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Anoop, M. B., & Rao, K. B. (2016). Performance Evaluation Of Corrosion-Affected Reinforced Concrete Bridge Girders Using Markov Chains With Fuzzy States. *Sādhanā*.
- Assakkaf, I. A., Ayyub, B. M., Hess, P. E., & Atua, K. (2002). Reliability-Based Load And Resistance Factor Design (Lrfd) Guidelines For Stiffened Panels And Grillages Of Ship Structures. *Naval Engineers Journal*.

- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung Sni 03-1729-2002*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2020). *Standar Pembebanan Gedung Sni 1727:2020*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bhowmick, A. K., & Grondin, G. Y. (2016). Limit State Design Of Steel Columns Reinforced With Welded Steel Plates. *Engineering Structures*.
- Biondini, F., Bontempi, F., & Malerba, P. G. (2004). Fuzzy Reliability Analysis Of Concrete Structures. *Computers & Structures*.
- El-Reedy, M. A. (2012). *Reinforced Concrete Structural Reliability*.
- Huang, B., Bathurst, R. J., & Allen, T. M. (2012). Lrfd Calibration For Steel Strip Reinforced Soil Walls. *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*.
- Kariyawasam, S. N., Rogowsky, D. M., & Macgregor, J. G. (1997). Resistance Factors And Companion-Action Load Factors For Reinforced Concrete Building Design In Canada. *Canadian Journal Of Civil Engineering*.
- Lee, G.-N., & Kim, D.-H. (2016). Seismic Reliability Analysis Of Offshore Wind Turbine Jacket Structure Using Stress Limit State. *Journal Of Ocean Engineering And Technology*.
- Rakoczy, A. M., Nowak, A. S., & Dick, S. (2016). Fatigue Reliability Model For Steel Railway Bridges. *Structure And Infrastructure Engineering*.
- Soubra, A.-H., & Mao, N. (2012). Probabilistic Analysis Of Obliquely Loaded Strip Foundations. *Soils And Foundations*.