

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Struktur portal beton bertulang merupakan salah satu sistem struktur yang paling umum digunakan pada bangunan bertingkat, khususnya di wilayah rawan gempa. Dalam perencanaan dan evaluasi struktur tahan gempa, kekakuan lateral antar tingkat (*interstory stiffness*) memegang peranan penting karena secara langsung memengaruhi respons dinamis struktur terhadap beban lateral. Distribusi kekakuan yang tidak merata antar lantai dapat menyebabkan konsentrasi simpangan, memicu terjadinya mekanisme *soft story*, dan pada kondisi tertentu berpotensi mengakibatkan keruntuhan lokal maupun global. Oleh karena itu, evaluasi kekakuan lateral antar tingkat menjadi aspek fundamental dalam menjamin kinerja dan keselamatan struktur bangunan bertingkat (Chopra, 2017; De Stefano & Pintucchi, 2008; Hibbeler & Tan, 2006).

Dalam praktik analisis struktur, kekakuan lateral antar tingkat umumnya ditentukan melalui pendekatan linier elastis. Pendekatan ini didasarkan pada hubungan antara gaya lateral yang bekerja dan simpangan lateral yang terjadi, sehingga menghasilkan nilai kekakuan tingkat yang bersifat praktis dan mudah diterapkan, terutama pada tahap perencanaan awal (Gere & Timoshenko, 1997; Hibbeler & Tan, 2006). Selain itu, formulasi kekakuan analitis klasik juga banyak digunakan, khususnya yang didasarkan pada kontribusi kekakuan lentur elemen kolom dengan asumsi kondisi batas tertentu. Formulasi tersebut menghasilkan ekspresi analitis tertutup yang sederhana dan efisien, sehingga masih banyak

dimanfaatkan dalam analisis dan evaluasi struktur bangunan bertingkat (Hosseini & Imagh-e-Naiini, 1999; Schultz, 1992).

Namun demikian, penerapan formulasi analitis klasik tersebut umumnya melibatkan sejumlah asumsi penyederhanaan, seperti pengabaian interaksi balok–kolom dan pengaruh konfigurasi global struktur. Pada struktur portal dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, asumsi-asumsi tersebut berpotensi menyebabkan perbedaan antara hasil perhitungan analitis dan respons aktual struktur. Beberapa studi menunjukkan bahwa pendekatan analitis klasik cenderung memberikan estimasi kekakuan lateral yang lebih besar dibandingkan dengan respons struktur yang diperoleh dari analisis numerik, khususnya pada struktur dengan konfigurasi tertentu (Gwalani et al., 2022; Vijayanarayanan et al., 2015).

Dalam konteks penelitian ini, kekakuan lateral antar tingkat diperoleh melalui dua pendekatan utama. Kekakuan aktual (K_{aktual}) merepresentasikan respons struktur yang diperoleh dari analisis numerik dan digunakan sebagai acuan perbandingan, sedangkan kekakuan analitis ($K_{analitis}$) diperoleh dari formulasi teoritis klasik yang umum digunakan dalam analisis struktur. Perbandingan antara kedua pendekatan tersebut menunjukkan adanya deviasi yang mencerminkan keterbatasan formulasi analitis dalam merepresentasikan respons struktur secara menyeluruh, terutama pada struktur portal dengan konfigurasi yang bervariasi.

Analisis numerik berbasis metode elemen hingga mampu memberikan gambaran respons struktur yang lebih realistis karena mempertimbangkan geometri aktual, interaksi antar elemen, serta kondisi batas secara lebih akurat (Bathe, 2006; McGuire et al., 2000). Akan tetapi, analisis numerik membutuhkan waktu dan sumber daya yang relatif lebih besar, sehingga kurang praktis untuk digunakan

secara luas pada tahap perencanaan awal atau studi parametrik dengan banyak variasi konfigurasi struktur.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu pendekatan yang mampu menjembatani kesenjangan antara kesederhanaan formulasi analitis dan akurasi hasil analisis numerik. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah melalui proses kalibrasi dan optimasi numerik terhadap formulasi kekakuan analitis, sehingga diperoleh model kekakuan yang tetap bersifat sederhana namun memiliki tingkat akurasi yang lebih baik. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada optimasi numerik untuk kalibrasi kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang, dengan tujuan menghasilkan formulasi kekakuan yang lebih representatif dan andal untuk digunakan dalam evaluasi dan perencanaan awal struktur bangunan bertingkat.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dapat diidentifikasi bahwa formulasi kekakuan lateral antar tingkat yang umum digunakan dalam analisis struktur portal beton bertulang masih mengandung sejumlah keterbatasan, terutama akibat asumsi penyederhanaan yang mengabaikan pengaruh konfigurasi global struktur. Pada struktur portal dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, pendekatan analitikal klasik berpotensi memberikan estimasi kekakuan lateral yang tidak sepenuhnya merepresentasikan respons aktual struktur.

Di sisi lain, analisis numerik mampu memberikan gambaran respons struktur yang lebih realistis, namun kurang praktis untuk diterapkan secara luas pada tahap perencanaan awal atau studi parametrik dengan banyak variasi

konfigurasi. Kondisi ini menimbulkan kesenjangan antara kebutuhan akan metode analisis yang sederhana dan kebutuhan akan hasil yang akurat.

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka permasalahan utama dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana perbedaan antara kekakuan lateral antar tingkat yang diperoleh dari pendekatan analitikal klasik ($K_{analytical}$) dan kekakuan lateral aktual yang diperoleh dari analisis numerik (K_{actual}) pada struktur portal beton bertulang dengan berbagai konfigurasi?
2. Sejauh mana formulasi kekakuan analitikal klasik mampu merepresentasikan respons lateral struktur portal beton bertulang, khususnya pada struktur dengan variasi jumlah bentang dan tingkat?
3. Bagaimana pengaruh konfigurasi struktur terhadap deviasi antara kekakuan analitikal dan kekakuan aktual pada struktur portal beton bertulang?
4. Bagaimana merumuskan pendekatan kalibrasi berbasis optimasi numerik untuk meningkatkan akurasi formulasi kekakuan lateral antar tingkat agar lebih mendekati respons aktual struktur, tanpa menghilangkan kesederhanaan formulasi analitikal?

1.3. BATASAN MASALAH

Agar penelitian ini terfokus dan dapat dilaksanakan secara sistematis, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Struktur yang dianalisis berupa portal beton bertulang dua dimensi (2D) dengan konfigurasi simetris, tanpa mempertimbangkan pengaruh eksentrisitas massa maupun beban eksentris.

2. Variasi konfigurasi struktur dibatasi pada portal dengan jumlah tingkat 1 hingga 7 dan jumlah bentang 1 hingga 7, sehingga diperoleh 49 variasi portal yang dianalisis.
3. Analisis struktur dilakukan dalam kondisi linier elastis, sehingga perilaku nonlinier material seperti retak beton, pelelehan tulangan, dan degradasi kekakuan tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini.
4. Kekakuan lateral antar tingkat dianalisis menggunakan:
 - pendekatan analitikal klasik berbasis formulasi kekakuan elemen struktur, dan
 - pendekatan numerik sebagai acuan pembanding untuk merepresentasikan respons aktual struktur.
5. Verifikasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS Gen, dengan pembebanan lateral statik ekuivalen, tanpa melakukan analisis dinamik riil atau analisis time history.
6. Material struktur diasumsikan homogen dan isotropik, dengan mutu beton, dimensi elemen struktur, serta tinggi antar lantai yang seragam untuk seluruh variasi portal.
7. Kalibrasi formulasi kekakuan analitikal dilakukan melalui optimasi numerik, yang bertujuan untuk meningkatkan kesesuaian antara hasil analitikal dan respons aktual struktur, tanpa dimaksudkan untuk menggantikan analisis numerik secara penuh.

1.4. KEASLIAN PENELITIAN

Penelitian mengenai kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang telah banyak dilakukan dalam literatur, baik melalui pendekatan analitikal maupun numerik. Sejumlah penelitian terdahulu mengembangkan metode estimasi kekakuan lateral sederhana berbasis formulasi analitis, serta mengkaji pengaruh distribusi kekakuan dan ketidakaturan struktur terhadap kinerja seismik bangunan (Hosseini & Imagh-e-Naiini, 1999; Schultz, 1992; Vijayanarayanan et al., 2015). Selain itu, analisis numerik juga banyak digunakan untuk mengevaluasi respons struktur yang lebih representatif terhadap beban lateral (Chopra, 2017; Gwalani et al., 2022).

Namun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya umumnya berfokus pada evaluasi atau perbandingan hasil antara pendekatan analitikal dan numerik, tanpa melakukan kalibrasi sistematis terhadap formulasi analitikal yang digunakan. Pendekatan analitikal klasik sering kali diterapkan secara langsung dengan asumsi-asumsi penyederhanaan tertentu, sehingga berpotensi menghasilkan estimasi kekakuan lateral yang kurang akurat, khususnya pada struktur portal dengan variasi konfigurasi jumlah bentang dan tingkat.

Keaslian penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan kalibrasi kekakuan lateral antar tingkat berbasis optimasi numerik yang dilakukan secara kuantitatif dan sistematis. Penelitian ini tidak hanya membandingkan kekakuan analitikal dan kekakuan aktual, tetapi juga mengidentifikasi pengaruh konfigurasi global struktur, terutama variasi jumlah bentang dan Tingkat, terhadap deviasi antara kedua pendekatan tersebut. Selanjutnya, deviasi tersebut digunakan sebagai

dasar untuk melakukan kalibrasi formulasi kekakuan analitikal melalui optimasi numerik.

Selain itu, penelitian ini menghasilkan suatu formulasi kekakuan terkalibrasi yang tetap mempertahankan kesederhanaan bentuk analitikal, namun memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap respons aktual struktur. Pendekatan ini memungkinkan penerapan yang lebih praktis pada tahap perencanaan awal dan evaluasi struktur, tanpa memerlukan analisis numerik yang kompleks untuk setiap konfigurasi.

Dengan demikian, keaslian penelitian ini tidak terletak pada penggantian teori yang telah ada, melainkan pada peningkatan akurasi dan keandalan formulasi kekakuan analitikal melalui proses kalibrasi dan optimasi numerik berbasis konfigurasi struktur, yang hingga saat ini masih jarang dibahas secara komprehensif dalam kajian struktur portal beton bertulang.

1.5. MANFAAT PENELITIAN

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Secara teoretis, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian analisis struktur, khususnya dalam evaluasi kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang. Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterbatasan formulasi kekakuan analitikal klasik serta menunjukkan peran konfigurasi global struktur terhadap deviasi antara kekakuan analitikal dan respons aktual struktur. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar pengembangan

pendekatan analitikal terkalibrasi berbasis optimasi numerik dalam studi-studi selanjutnya.

2. Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam memperkirakan kekakuan lateral antar tingkat secara lebih akurat namun tetap sederhana, khususnya pada tahap perencanaan awal dan evaluasi struktur bangunan bertingkat. Formulasi kekakuan terkalibrasi yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alat bantu dalam mengidentifikasi potensi ketidakaturan kekakuan vertikal (*vertical stiffness irregularity*) dan kecenderungan terjadinya *soft story* tanpa harus melakukan analisis numerik yang kompleks untuk setiap konfigurasi struktur.
3. Secara akademik, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti lain dalam melakukan kajian lanjutan terkait analisis statik lateral, evaluasi kekakuan antar tingkat, serta pengembangan dan kalibrasi formulasi analitikal dalam analisis struktur bangunan bertingkat. Penelitian ini juga dapat dijadikan contoh penerapan optimasi numerik dalam pengembangan model analitis di bidang teknik struktur.

1.6. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang menggunakan pendekatan analitikal klasik serta

membandingkannya dengan kekakuan lateral aktual yang diperoleh dari analisis numerik.

2. Mengevaluasi pengaruh variasi jumlah tingkat dan jumlah bentang portal terhadap nilai kekakuan lateral antar tingkat serta deviasi antara hasil pendekatan analitikal dan respons aktual struktur.
3. Menilai tingkat kesesuaian formulasi kekakuan analitikal klasik dalam merepresentasikan respons lateral struktur portal beton bertulang dengan berbagai konfigurasi.
4. Mengembangkan pendekatan kalibrasi kekakuan lateral antar tingkat berbasis optimasi numerik, sehingga formulasi analitikal yang digunakan dapat memberikan estimasi kekakuan yang lebih mendekati respons aktual struktur.
5. Menghasilkan formulasi kekakuan lateral antar tingkat yang terkalibrasi, yang tetap sederhana dan praktis untuk digunakan pada tahap perencanaan awal dan evaluasi struktur bangunan bertingkat.

1.7. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan tesis ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai alur pembahasan dan keterkaitan antar bab yang disajikan. Tesis ini terdiri dari enam bab dengan susunan sebagai berikut.

Bab I Pendahuluan berisi latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, keaslian penelitian, manfaat penelitian, tujuan penelitian, serta sistematika penulisan. Bab ini menguraikan dasar pemikiran dan urgensi

penelitian mengenai kalibrasi kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang.

Bab II Tinjauan Pustaka menyajikan kajian teoritis dan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian. Bab ini membahas konsep kekakuan lateral struktur, pendekatan analitikal klasik, pendekatan berbasis deformasi akibat gaya lateral, analisis numerik sebagai acuan respons aktual struktur, serta penelitian-penelitian terkait. Pada bagian akhir bab ini disajikan tinjauan mutakhir dan kesenjangan penelitian yang menjadi dasar dilakukannya penelitian ini.

Bab III Landasan Teori menguraikan konsep dan formulasi teoritis yang digunakan sebagai dasar analisis dalam penelitian. Bab ini memuat pembahasan mengenai konsep kekakuan lateral antar tingkat, definisi kekakuan lateral aktual dan kekakuan lateral analitikal klasik, serta keterbatasan pendekatan analitikal klasik dalam merepresentasikan respons lateral struktur portal beton bertulang.

Bab IV Metodologi Penelitian menjelaskan tahapan dan prosedur penelitian yang dilakukan. Bab ini mencakup pendekatan penelitian, pemodelan struktur portal beton bertulang, penentuan kekakuan lateral aktual melalui analisis numerik, perumusan kekakuan lateral analitikal, serta proses kalibrasi formulasi kekakuan melalui optimasi numerik. Selain itu, bab ini juga menjelaskan parameter yang digunakan, fungsi objektif optimasi, kriteria konvergensi, dan perangkat lunak yang digunakan dalam analisis.

Bab V Hasil Penelitian dan Pembahasan menyajikan hasil analisis kekakuan lateral antar tingkat yang diperoleh dari pendekatan analitikal dan numerik, serta hasil kalibrasi formulasi kekakuan. Hasil penelitian dibahas

secara terpadu dengan meninjau pengaruh variasi jumlah tingkat dan jumlah bentang terhadap deviasi kekakuan, serta tingkat kesesuaian formulasi kekakuan terkalibrasi dalam merepresentasikan respons aktual struktur.

Bab VI Kesimpulan dan Saran memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, serta saran yang berkaitan dengan keterbatasan penelitian dan peluang pengembangan penelitian selanjutnya.

