

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. KEKAKUAN LATERAL STRUKTUR

Kekakuan lateral merupakan parameter fundamental dalam menentukan respons struktur terhadap beban gempa. Kekakuan lateral menggambarkan kemampuan struktur dalam menahan deformasi lateral akibat gaya luar, sehingga sangat berpengaruh terhadap besarnya simpangan dan distribusi deformasi antar tingkat. Pada bangunan bertingkat, kekakuan lateral antar tingkat sering digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi potensi terjadinya konsentrasi deformasi serta mekanisme *soft story*, yang diketahui berkontribusi signifikan terhadap kerentanan struktur terhadap keruntuhan seismik (Chopra, 2017; De Stefano & Pintucchi, 2008; Hibbeler & Tan, 2006).

Dalam konteks analisis struktur linier elastis, kekakuan lateral antar tingkat umumnya didefinisikan berdasarkan hubungan antara gaya lateral dan simpangan yang terjadi. Secara umum, kekakuan tingkat dinyatakan sebagai rasio gaya lateral terhadap simpangan antar tingkat, yang merepresentasikan karakteristik elastik struktur pada kondisi kerja linier (Gere & Timoshenko, 1997; Hibbeler & Tan, 2006). Pendekatan ini banyak digunakan dalam analisis struktur karena bersifat sederhana, mudah diterapkan, dan cukup representatif untuk estimasi awal respons struktur, khususnya pada tahap perencanaan awal dan evaluasi kinerja struktur bangunan bertingkat.

2.2. PENDEKATAN ANALITIKAL KLASIK DALAM EVALUASI KEKAKUAN LATERAL

Pendekatan analitikal klasik dalam evaluasi kekakuan lateral struktur portal beton bertulang umumnya didasarkan pada asumsi perilaku linier elastis dan idealisasi elemen struktur sebagai batang lentur dengan kondisi batas tertentu. Dalam pendekatan ini, kekakuan lateral antar tingkat dihitung berdasarkan kontribusi kekakuan lentur elemen kolom yang menopang tingkat tersebut, sementara pengaruh elemen lain seperti balok sering kali disederhanakan atau

diabaikan. Pendekatan ini banyak digunakan karena menghasilkan formulasi tertutup yang sederhana dan efisien untuk perhitungan manual maupun estimasi awal respons struktur (Gere & Timoshenko, 1997; Hibbeler & Tan, 2006).

Salah satu formulasi analitikal klasik yang paling umum digunakan adalah perhitungan kekakuan kolom dengan asumsi kondisi ujung jepit–jepit atau jepit–bebas, yang diturunkan dari teori elastisitas lentur. Dalam konteks struktur portal, kolom sering dimodelkan sebagai elemen lentur dengan kekakuan lateral proporsional terhadap parameter elastisitas material dan momen inersia penampang, serta berbanding terbalik dengan pangkat tiga tinggi kolom. Pendekatan ini telah digunakan secara luas dalam berbagai studi untuk memperkirakan kekakuan lateral tingkat pada struktur rangka elastis (Hosseini & Imagh-e-Naiini, 1999; Schultz, 1992).

Selain itu, pendekatan analitikal klasik juga menjadi dasar dalam formulasi kekakuan global struktur rangka melalui metode matriks kekakuan. Metode ini memungkinkan perhitungan respons struktur secara sistematis dengan menggabungkan kekakuan elemen individual ke dalam sistem persamaan global, dan telah dibahas secara komprehensif dalam literatur analisis struktur klasik maupun modern (Arfiadi, 2011; Nelson & McCormac, 2003).

Meskipun bersifat praktis dan efisien, pendekatan analitikal klasik memiliki keterbatasan akibat asumsi penyederhanaan yang digunakan. Pengaruh interaksi balok–kolom, konfigurasi global struktur, serta distribusi kekakuan antar tingkat sering kali tidak sepenuhnya terakomodasi dalam formulasi sederhana ini. Akibatnya, pada struktur portal dengan variasi jumlah bentang dan jumlah tingkat, pendekatan analitikal klasik berpotensi menghasilkan estimasi kekakuan lateral yang menyimpang dari respons struktur yang lebih realistis (Gwalani et al., 2022; Vijayanarayanan et al., 2017a).

2.3. PENDEKATAN BERBASIS DEFORMASI AKIBAT GAYA LATERAL

Selain pendekatan analitikal berbasis kekakuan elemen, pendekatan lain yang umum digunakan adalah pendekatan berbasis deformasi akibat gaya lateral. Pendekatan berbasis deformasi akibat gaya lateral merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi respons struktur bangunan bertingkat

terhadap beban gempa. Pendekatan ini menitikberatkan pada hubungan antara distribusi gaya lateral dan deformasi yang terjadi pada masing-masing tingkat, sehingga memungkinkan evaluasi respons struktur secara global berdasarkan karakteristik deformasinya (Chopra, 2017).

Dalam konteks analisis struktur bertingkat, pendekatan ini umumnya diterapkan dalam bentuk analisis statik ekuivalen, di mana beban gempa direpresentasikan sebagai gaya lateral statik yang didistribusikan ke setiap tingkat sesuai dengan massa dan karakteristik dinamis struktur. Simpangan lateral yang dihasilkan pada setiap lantai kemudian digunakan untuk mengevaluasi kekakuan antar tingkat dan distribusi deformasi sepanjang tinggi bangunan (Chopra, 2017; Paz & Young, 2019).

Simpangan antar tingkat yang diperoleh dari respons elastis struktur dapat digunakan sebagai dasar untuk menilai karakteristik kekakuan relatif antar tingkat, tanpa harus mengetahui besaran absolut gaya internal secara rinci (Chopra, 2017). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola deformasi struktur secara lebih representatif terhadap perilaku dinamis, khususnya pada struktur dengan banyak derajat kebebasan.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis deformasi akibat gaya lateral efektif digunakan untuk mengevaluasi ketidakaturan kekakuan antar tingkat (*stiffness irregularity*) dan potensi terjadinya mekanisme *soft story*. Distribusi simpangan lateral dan bentuk deformasi struktur dapat menjadi indikator yang sensitif terhadap ketidakaturan kekakuan vertikal pada bangunan bertingkat (Vijayanarayanan et al., 2015, 2017b). Selain itu, pendekatan ini juga banyak digunakan dalam studi evaluasi kinerja seismik bangunan rangka beton bertulang dengan konfigurasi dan distribusi kekakuan yang bervariasi (Gwalani et al., 2022; Mehta & Chey, 2023).

Meskipun mampu merepresentasikan perilaku global struktur secara lebih realistis dibandingkan formulasi analitikal klasik, pendekatan berbasis deformasi akibat gaya lateral tetap bergantung pada asumsi elastisitas linier dan penyederhanaan distribusi beban. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh perlu diverifikasi dan dibandingkan dengan pendekatan lain untuk memastikan tingkat akurasi dan keterandalannya dalam merepresentasikan respons aktual struktur.

2.4. ANALISIS NUMERIK SEBAGAI ACUAN RESPONS AKTUAL STRUKTUR

Analisis numerik berbasis metode elemen hingga (*finite element method*, FEM) merupakan pendekatan yang banyak digunakan untuk mengevaluasi respons struktur secara lebih realistis terhadap beban lateral. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan struktur dengan mempertimbangkan geometri aktual, kondisi batas, serta interaksi antar elemen struktur secara sistematis, sehingga mampu merepresentasikan perilaku struktur yang lebih mendekati kondisi nyata dibandingkan pendekatan analitikal sederhana (Bathe, 2006; McGuire et al., 2000).

Dalam analisis struktur bangunan bertingkat, analisis numerik sering digunakan sebagai acuan atau *benchmark* untuk mengevaluasi akurasi pendekatan analitikal dan semi-empiris. Dengan menggunakan model elastis linier, hasil analisis numerik berupa simpangan lateral antar tingkat dapat secara langsung digunakan untuk menentukan kekakuan lateral aktual berdasarkan hubungan gaya–simpangan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi respons struktur yang konsisten dengan asumsi elastisitas linier yang digunakan dalam formulasi analitikal klasik (Bathe, 2006; Chopra, 2017).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa hasil analisis numerik berbasis FEM memberikan estimasi respons struktur yang lebih representatif, khususnya pada struktur dengan konfigurasi geometri yang kompleks atau distribusi kekakuan yang tidak seragam. Oleh karena itu, analisis numerik banyak digunakan sebagai dasar verifikasi dalam studi perbandingan metode analisis struktur, termasuk dalam evaluasi kekakuan lateral antar tingkat dan identifikasi ketidakaturan kekakuan vertikal (Gwalani et al., 2022; Kwon & Ghannoum, 2016).

Meskipun memiliki tingkat akurasi yang tinggi, analisis numerik memerlukan waktu komputasi dan sumber daya yang relatif lebih besar dibandingkan pendekatan analitikal sederhana. Hal ini menyebabkan keterbatasan penerapan analisis numerik secara luas, terutama pada tahap perencanaan awal atau studi parametrik dengan banyak variasi konfigurasi struktur. Oleh karena itu, hasil analisis numerik dalam penelitian ini digunakan sebagai acuan respons aktual struktur (K_{Actual}) untuk mengevaluasi dan mengkalibrasi formulasi kekakuan analitikal yang lebih sederhana.

2.5. PENELITIAN TERDAHULU TERKAIT KEKAKUAN LATERAL DAN KETIDAKATURAN STRUKTUR

Kajian mengenai kekakuan lateral dan distribusinya pada bangunan bertingkat telah dilakukan oleh berbagai peneliti melalui pendekatan analitikal, numerik, maupun kombinasi keduanya. Penelitian awal dalam bidang ini banyak berfokus pada pengembangan formulasi sederhana untuk memperkirakan kekakuan lateral antar tingkat sebagai dasar evaluasi perilaku elastik struktur rangka.

Pengembangan pendekatan analitikal sederhana untuk memperkirakan kekakuan lateral antar tingkat pada rangka elastik dengan asumsi perilaku linier dan konfigurasi struktur yang ideal (Schultz, 1992). Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa meskipun pendekatan tersebut efisien dan mudah diterapkan, tingkat akurasi menurun ketika diterapkan pada struktur dengan konfigurasi yang lebih kompleks. Selanjutnya, memperkenalkan metode cepat untuk mengestimasi kekakuan lateral sistem bangunan, yang bertujuan meningkatkan efisiensi perhitungan pada tahap awal perencanaan (Hosseini & Imagh-e-Naiini, 1999). Namun, metode ini masih bergantung pada asumsi penyederhanaan yang membatasi penerapannya pada struktur dengan geometri dan distribusi kekakuan yang sederhana.

Perhatian terhadap ketidakaturan kekakuan (*stiffness irregularity*) mulai mendapat perhatian lebih dalam penelitian-penelitian berikutnya. Diusulkan metode identifikasi ketidakaturan kekakuan pada bangunan bertingkat berdasarkan distribusi deformasi dan karakteristik kekakuan antar Tingkat (Vijayanarayanan et al., 2015). Penelitian lanjutan menunjukkan bahwa estimasi kekakuan tingkat dan bentuk modus lateral dapat digunakan sebagai indikator yang efektif untuk mendeteksi ketidakaturan kekakuan vertikal dan potensi terjadinya mekanisme *soft story* (Vijayanarayanan et al., 2017a).

Selain pendekatan analitikal, berbagai penelitian juga memanfaatkan analisis numerik untuk mengevaluasi pengaruh distribusi kekakuan lateral terhadap kinerja seismik struktur rangka beton bertulang. Pengaruh proporsi kekakuan lateral pada arah ortogonal terhadap respons seismik bangunan beton bertulang dan menunjukkan bahwa distribusi kekakuan yang tidak seimbang dapat meningkatkan simpangan dan konsentrasi deformasi (Gwalani et al., 2022). Kinerja seismik

bangunan rangka beton bertulang dengan ketidakaturan geometris, dan menegaskan bahwa variasi konfigurasi struktur berpengaruh signifikan terhadap respons lateral dan distribusi simpangan (Mehta & Chey, 2023). Selain itu, evaluasi perilaku struktur rangka beton bertulang dengan kondisi *soft story* serta upaya perkuatannya, yang menunjukkan peran penting kekakuan lateral dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap gempa (Manos et al., 2022).

Secara umum, penelitian-penelitian terdahulu tersebut menegaskan bahwa kekakuan lateral dan distribusinya merupakan faktor kunci dalam menentukan respons seismik bangunan bertingkat. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi, identifikasi, atau perbandingan respons struktur, tanpa mengembangkan pendekatan kalibrasi kuantitatif terhadap formulasi kekakuan analitikal yang digunakan.

2.6. TINJAUAN MUTAKHIR DAN KESENJANGAN PENELITIAN

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah diuraikan, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai kekakuan lateral antar tingkat pada bangunan bertingkat telah berkembang dari pendekatan analitikal sederhana menuju kajian numerik dan evaluasi kinerja seismik yang lebih komprehensif. Penelitian klasik menitikberatkan pada pengembangan formulasi analitikal untuk memperkirakan kekakuan lateral antar tingkat secara cepat dan efisien, yang umumnya didasarkan pada asumsi perilaku linier elastis serta konfigurasi struktur yang ideal (Hosseini & Imagh-e-Naiini, 1999; Schultz, 1992).

Seiring berkembangnya kebutuhan evaluasi struktur tahan gempa, penelitian mutakhir mulai mengkaji pengaruh distribusi kekakuan lateral, ketidakaturan vertikal, serta variasi konfigurasi struktur terhadap respons seismik bangunan. Studi-studi tersebut menegaskan bahwa ketidakseimbangan kekakuan antar tingkat dapat menyebabkan konsentrasi deformasi dan meningkatkan kerentanan struktur terhadap mekanisme *soft story* (Gwalani et al., 2022; Mehta & Chey, 2023; Vijayanarayanan et al., 2015, 2017a). Selain itu, analisis numerik berbasis metode elemen hingga semakin banyak digunakan sebagai acuan untuk menggambarkan respons struktur yang lebih realistis terhadap beban lateral.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada evaluasi respons struktur atau identifikasi ketidakaturan kekakuan, tanpa melakukan kalibrasi sistematis terhadap formulasi kekakuan analitikal yang digunakan. Formulasi analitikal klasik umumnya diterapkan secara langsung, dengan asumsi bahwa hasilnya cukup representatif, padahal berbagai studi menunjukkan adanya kecenderungan *overestimation* kekakuan lateral apabila dibandingkan dengan hasil analisis numerik, khususnya pada struktur portal dengan variasi jumlah bentang dan tingkat.

Selain itu, keterkaitan antara konfigurasi global struktur, seperti jumlah bentang dan jumlah Tingkat, dengan deviasi antara kekakuan analitikal dan kekakuan aktual belum banyak dikaji secara kuantitatif. Penelitian yang ada umumnya tidak mengeksplorasi bagaimana pengaruh konfigurasi tersebut dapat dimanfaatkan sebagai dasar untuk memperbaiki atau mengkalibrasi formulasi kekakuan analitikal agar lebih mendekati respons aktual struktur.

Dengan demikian, kesenjangan penelitian (*research gap*) yang dapat diidentifikasi adalah belum adanya kajian yang secara sistematis melakukan kalibrasi kekakuan lateral antar tingkat pada struktur portal beton bertulang melalui optimasi numerik, dengan mempertimbangkan pengaruh konfigurasi struktur secara eksplisit. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan pendekatan kalibrasi berbasis optimasi numerik terhadap formulasi kekakuan analitikal, sehingga diperoleh model kekakuan yang tetap sederhana namun memiliki tingkat kesesuaian yang lebih baik terhadap respons aktual struktur. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis sekaligus praktis dalam evaluasi dan perencanaan awal struktur bangunan bertingkat di wilayah rawan gempa.