BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Beberapa tahun terakhir telah menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dalam pembangunan infrastruktur gedung bertingkat tinggi, baik secara global maupun di Indonesia. Pertumbuhan kawasan perkotaan, keterbatasan ketersediaan lahan, serta meningkatnya kebutuhan ruang untuk kegiatan pendidikan, komersial, perkantoran, dan hunian menyebabkan pembangunan secara vertikal menjadi salah satu alternatif dalam pemanfaatan ruang perkotaan. Perkembangan tersebut juga mendorong munculnya konfigurasi bangunan bertingkat tinggi yang semakin kompleks, termasuk sistem bangunan yang terdiri atas dua menara atau *twin tower* yang dihubungkan oleh elemen struktur horizontal seperti *skybridge* atau rangka penghubung. Sistem bangunan yang saling terhubung tersebut memiliki karakteristik perilaku struktur yang berbeda dibandingkan dengan dua bangunan yang berdiri secara independen karena adanya interaksi gaya dan perpindahan antara kedua menara (Arada et al., 2022a).

Pembangunan gedung bertingkat tinggi dengan konfigurasi *twin tower* tidak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan ruang, tetapi juga menghasilkan sistem struktur yang mampu memberikan fungsi tambahan berupa konektivitas antarbangunan. Elemen penghubung seperti *skybridge* dapat berfungsi sebagai jalur sirkulasi, ruang penghubung, maupun elemen yang berpengaruh terhadap respons struktur terhadap pembebanan lateral. Penelitian mengenai bangunan tinggi yang dihubungkan menggunakan *skybridge* menunjukkan bahwa keberadaan elemen penghubung dapat memengaruhi kekakuan lateral, perpindahan, *inter-storey drift*, frekuensi alami, serta pola respons bangunan terhadap beban gempa. Oleh karena itu, posisi, jenis sambungan, serta karakteristik elemen penghubung perlu diperhatikan dalam analisis struktur bangunan *twin tower* (Arada et al., 2022a).

Seiring dengan bertambahnya kebutuhan akan ruang vertikal karena keterbatasan lahan, sistem struktur bangunan juga mengalami perkembangan yang semakin kompleks. Salah satu bentuk perkembangan tersebut adalah penerapan sistem bangunan menara kembar

yang saling dihubungkan melalui elemen struktur seperti *skybridge* atau rangka *truss*. Hubungan antara dua menara menyebabkan gaya dan deformasi pada salah satu menara dapat memengaruhi menara lainnya. Pada kondisi pembebanan lateral, khususnya gempa, elemen penghubung dapat menerima gaya yang cukup besar akibat perbedaan respons kedua menara. Penelitian terhadap struktur *twin tower* yang terhubung menunjukkan bahwa elemen *skybridge* dapat memberikan kontribusi terhadap pengendalian perpindahan dan *inter-storey drift*, tetapi pada saat yang sama sambungan antara elemen penghubung dengan struktur utama menjadi bagian yang perlu diperhatikan secara khusus (Arada et al., 2022a).

Sambungan pada struktur bangunan merupakan salah satu bagian penting yang berfungsi untuk meneruskan gaya dari satu elemen struktur ke elemen lainnya. Pada sambungan balok dan kolom beton bertulang, daerah tersebut menerima kombinasi gaya aksial, momen, dan gaya geser yang kompleks. Kondisi tersebut menyebabkan daerah sambungan menjadi salah satu bagian yang kritis, terutama ketika struktur menerima beban lateral akibat gempa. Penelitian mengenai kekuatan geser sambungan balok-kolom beton bertulang menunjukkan bahwa daerah sambungan memiliki peranan penting dalam menjaga kapasitas struktur karena gaya geser yang bekerja pada daerah tersebut dapat menjadi sangat besar ketika struktur mengalami pembebanan gempa .(Tampubolon, 2021)

Permasalahan pada sambungan balok-kolom menjadi semakin penting karena kerusakan pada daerah tersebut dapat menyebabkan penurunan kekakuan, kapasitas, dan daktilitas struktur. Apabila kapasitas geser sambungan tidak mencukupi, kerusakan dapat berkembang secara cepat pada daerah inti sambungan dan berpotensi menghasilkan mekanisme keruntuhan yang bersifat getas. Oleh karena itu, perencanaan sambungan tidak hanya harus mempertimbangkan kemampuan elemen dalam menahan gaya lentur, tetapi juga harus memastikan bahwa kapasitas geser sambungan mencukupi terhadap gaya yang terjadi selama struktur menerima beban lateral (Tampubolon, 2021).

Pada bangunan yang berada di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi, kemampuan sambungan dalam mempertahankan integritas struktur menjadi semakin penting. Indonesia merupakan negara yang memiliki aktivitas kegempaan tinggi sehingga struktur bangunan harus direncanakan dengan mempertimbangkan pengaruh beban gempa sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Evaluasi terhadap bangunan beton bertulang yang berada di

Kota Palu menunjukkan bahwa gempa tahun 2018 menyebabkan berbagai tingkat kerusakan pada bangunan beton bertulang. Hasil evaluasi terhadap salah satu bangunan beton bertulang di Palu menunjukkan bahwa respons struktur terhadap gempa dapat menghasilkan kerusakan pada elemen struktur dan mekanisme keruntuhan yang tidak selalu sesuai dengan mekanisme yang diharapkan dalam desain tahan gempa (Nugroho et al., 2024).

Kejadian gempa Palu tahun 2018 memberikan gambaran bahwa kinerja struktur beton bertulang terhadap beban gempa perlu dievaluasi secara menyeluruh, tidak hanya berdasarkan kapasitas global struktur tetapi juga berdasarkan perilaku elemen dan daerah sambungan. Penelitian terhadap bangunan yang mengalami kerusakan akibat gempa Palu menunjukkan bahwa evaluasi kinerja seismik dapat digunakan untuk mengidentifikasi tingkat kerusakan, pembentukan sendi plastis, serta mekanisme keruntuhan struktur. Hasil analisis menunjukkan bahwa suatu bangunan dapat mencapai tingkat kinerja *Life Safety*, yaitu kondisi ketika struktur masih memiliki kemampuan untuk mencegah keruntuhan total meskipun telah mengalami kerusakan dan penurunan kekuatan (Nugroho et al., 2024).

Dalam penerapan perencanaan struktur, analisis menggunakan perangkat lunak seperti SAP2000 umumnya digunakan untuk mengetahui respons struktur secara global, seperti gaya aksial, gaya geser, momen, perpindahan, dan respons struktur akibat kombinasi pembebanan. Namun, hasil analisis struktur secara global belum mampu memberikan gambaran secara rinci mengenai perilaku lokal pada daerah sambungan. Distribusi tegangan, konsentrasi tegangan, pola keretakan beton, regangan tulangan, serta perkembangan kerusakan beton pada daerah sambungan membutuhkan pendekatan analisis yang lebih detail. Oleh karena itu, analisis struktur global dapat dilengkapi dengan analisis lokal menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk memperoleh informasi mengenai perilaku struktur pada daerah kritis.

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk memodelkan perilaku struktur secara lebih detail dengan mempertimbangkan geometri, material, interaksi antar-elemen, kondisi batas, serta pembebanan yang bekerja. Pada struktur beton bertulang, metode elemen hingga dapat digunakan untuk mengamati respons struktur hingga memasuki kondisi nonlinier dan mengalami kerusakan. Penelitian terhadap

sambungan balok-kolom beton bertulang menggunakan pemodelan numerik menunjukkan bahwa model tiga dimensi dapat digunakan untuk mengevaluasi kapasitas momen dan geser sekaligus mengidentifikasi konsentrasi tegangan pada daerah sambungan (Aminullah & Iman, 2022).

Penggunaan metode elemen hingga juga memberikan keuntungan dalam mengidentifikasi pola kerusakan yang sulit diamati melalui analisis struktur konvensional. Penelitian terhadap sambungan balok-kolom beton bertulang menggunakan analisis numerik menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi sambungan dapat memengaruhi distribusi tegangan, pola retak, serta kapasitas sambungan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perilaku lokal pada daerah sambungan memiliki karakteristik yang kompleks sehingga diperlukan pemodelan tiga dimensi untuk memperoleh gambaran distribusi tegangan dan kerusakan secara lebih detail (Aminullah & Iman, 2022).

Salah satu perangkat lunak yang dapat digunakan dalam analisis metode elemen hingga adalah ABAQUS. Perangkat lunak tersebut mampu melakukan analisis nonlinier terhadap struktur beton bertulang dengan mempertimbangkan interaksi antara beton dan tulangan serta perilaku material ketika mengalami pembebanan. Penelitian mengenai analisis nonlinier sambungan balok-kolom beton bertulang menggunakan ABAQUS menunjukkan bahwa pemodelan tiga dimensi dapat digunakan untuk merepresentasikan perilaku sambungan dan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model elemen hingga dapat mereproduksi perilaku struktur dan digunakan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi sambungan terhadap kapasitas serta pola kerusakan (Qasem et al., 2022).

Dalam pemodelan beton menggunakan ABAQUS, salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk menggambarkan perilaku beton nonlinier adalah *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Model CDP memungkinkan perilaku beton terhadap pembebanan tarik dan tekan direpresentasikan melalui parameter plastisitas dan kerusakan material. Penggunaan model CDP pada analisis sambungan balok-kolom menunjukkan bahwa pendekatan tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi respons nonlinier, pola kerusakan beton, serta perkembangan tegangan pada daerah sambungan (Desta et al., 2022)

Penggunaan ABAQUS dengan pendekatan *Concrete Damaged Plasticity* juga telah diterapkan dalam penelitian sambungan balok-kolom yang menerima pembebanan siklik. Hasil analisis menunjukkan bahwa pemodelan elemen hingga dapat digunakan untuk mengevaluasi respons beban-perpindahan, tegangan geser, regangan plastis, dan pola kerusakan pada sambungan. Perbandingan antara hasil numerik dan hasil eksperimental menunjukkan bahwa model numerik dapat memberikan representasi yang cukup baik terhadap perilaku sambungan beton bertulang pada pembebanan siklik (Hayat et al., 2021)

Penelitian yang lebih baru mengenai sambungan balok-kolom juga menunjukkan perkembangan penggunaan FEM berbasis ABAQUS dan CDP untuk mengevaluasi kekuatan serta daktilitas sambungan. Silveira et al. (2024) melakukan pemodelan sambungan balok-kolom menggunakan metode elemen hingga berbasis ABAQUS dengan pendekatan *Concrete Damaged Plasticity*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa daerah sambungan merupakan daerah yang sangat penting untuk dievaluasi karena pembebanan yang besar, khususnya akibat gempa, dapat menghasilkan retak dan kerusakan pada daerah inti sambungan. Analisis numerik memungkinkan pola kerusakan dan respons daktilitas sambungan diamati secara lebih detail (da Silveira et al., 2024)

Selain perilaku beton, pemodelan numerik juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi perkembangan tegangan dan regangan pada komponen sambungan. Penelitian terbaru mengenai *nonlinear finite element* pada sambungan balok-kolom menunjukkan bahwa pendekatan CDP dapat digunakan untuk mengevaluasi deformasi, evolusi regangan, serta distribusi tegangan pada komponen struktur. Hasil tersebut menunjukkan bahwa analisis FEM dapat memberikan informasi mengenai komponen kritis yang tidak dapat diperoleh hanya melalui analisis struktur global (Hong & Pham, 2026)

1.2 Rumusan Masalah

Dari penjelasan yang telah disampaikan , berikut adalah beberapa pertanyaan penelitian yang akan diselidiki dalam penelitian ini, yaitu .

1. Seperti apa sebaran tegangan yang muncul pada sambungan geser pada Twin Tower UPN Surabaya menurut analisis yang dilakukan dengan metode Elemen Hingga menggunakan ABAQUS?

2. Di titik mana saja zona kritis pada sambungan geser yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan serta kerusakan akibat terdapat beban yang diterapkan ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pernyataan masalah di atas , tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut .

1. Melakukan analisis terhadap distribusi tegangan yang terjadi pada sambungan geser dari struktur rangka truss atau joint balok-kolom Twin Tower UPN Surabaya dengan memanfaatkan metode Finite Element Method (FEM) menggunakan perangkat keras ABAQUS.
2. Menentukan area kritis pada sambungan geser yang mengalami konsentrasi tegangan terbesar dan berisiko mengakibatkan kerusakan sebagai dampak dari beban yang diterapkan

1.4 Batasan Penelitian

Berikut adalah batasan -batasan yang terdapat dalam penelitian ini.

1. Analisis hanya dilakukan pada sambungan yang menunjukkan gaya dalam maksimum sesuai hasil analisis struktur yang diolah dengan SAP2000.
2. Pemodelan numerik dilakukan dengan memanfaatkan metode Finite Element Method (FEM) yang didukung oleh perangkat lunak ABAQUS CAE.
3. Bahan yang digunakan dalam pemodelan mengikuti informasi dari perencanaan struktur, mencakup kualitas beton, kualitas baja tulangan, modulus elastisitas, rasio Poisson, dan parameter Concrete Damaged Plasticity (CDP) yang sesuai dengan data penelitian.
4. Pembebanan yang dikaji meliputi beban mati, beban hidup, dan beban akibat gempa , berdasarkan kombinasi beban yang sesuai dengan regulasi SNI 1726:2019 dan SNI 1727:2020.
6. Analisis ini difokuskan pada perilaku lokal dari sambungan, sehingga tidak membahas perilaku keseluruhan struktur gedung.
7. Faktor-faktor yang diteliti dalam kajian ini meliputi :

a) jenis kerusakan pada beton (Kekakuan Plastik Kerusakan Beton);

b) tekanan yang terjadi pada tulangan; serta

c) penggulangan wilayah yang perlu diperhatikan (zona kritis) pada sambungan.

8. Kajian ini tidak mencakup analisis mengenai pelaksanaan pembangunan , teknik pekerjaan, perkiraan anggaran , maupun penjadwalan proyek, melainkan hanya berkonsentrasi pada penilaian kinerja struktural sambungan berdasarkan hasil simulasi numerik.

1.5 Manfaat Penelitian

Berikut adalah manfaat dari penelitian ini yang diharapkan dapat memberikan referensi tambahan dalam melaksanakan penelitian .

1. Menjadi bahan pertimbangan bagi perencana struktur untuk menilai keamanan serta efektivitas sambungan terhadap kombinasi beban mati, beban hidup, dan beban gempa sesuai dengan ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI).
2. Membantu dalam mengidentifikasi titik kritis pada sambungan yang mungkin mengalami konsentrasi tegangan atau kerusakan , sehingga informasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk perbaikan atau peningkatan desain struktur..
3. Memberikan wawasan tentang penggunaan perangkat lunak ABAQUS untuk menganalisis elemen hingga sebagai alternatif yang lebih mendetail dibandingkan dengan metode perhitungan biasa dalam memahami perilaku sambungan struktur.
4. Menjadi sumber rujukan bagi pelajar, pengajar, konsultan, dan praktisi teknik sipil dalam menganalisis serta efektivitas penyambungan struktur menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method).