

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Rodriguez dan Park (1993) melakukan pengujian pada kolom beton bujursangkar 350 mm yang didesain sebelum tahun 1970 dengan *jacketing* beton setebal 100 mm. Empat buah spesimen dibuat, dua diantaranya kemudian dirusak dengan pembebanan seismik. Kemudian keempat spesimen tersebut diperkuat dengan jaket beton bertulang, dengan jumlah tulangan transversal 8 dan 12, masing-masing untuk spesimen yang dirusak dan tidak dirusak.

Pengujian seismik pada dua kolom sebelum diberi jaket yang mewakili kolom beton yang didesain dan dibangun sebelum tahun 1950-an, menunjukkan bahwa kolom dengan desain sebelum menggunakan peraturan seismik memiliki daktilitas yang rendah. *Jacketing* beton menaikkan kekuatan dan kekakuan secara signifikan. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa kerusakan kolom sebelum pemasangan jaket tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa seismik kolom berjaket.

Ghobarah, Aziz, dan Biddah (1997) melakukan investigasi eksperimental yang bertujuan untuk mempelajari model keruntuhan sambungan kolom-balok yang didesain pada dekade 1970-an. Sambungan kolom-balok dan daerah sekitarnya dibungkus dengan jaket baja bergelombang yang disambung dengan pengelasan. Antara baja dan beton diinjeksi dengan grout tanpa penyusutan (*non-shrink grout*). Variasi spesimen dilakukan pada detail penulangan kolom dan balok

pada daerah sambungan beton yang telah ada, yaitu jumlah tulangan transversal pada kolom dan balok.

Pengujian untuk mengevaluasi performa struktur yang telah ada, dilakukan dengan spesimen sambungan berskala besar. Pengujian juga mengevaluasi *effectiveness* balok, kolom, sambungan yang diperbaiki menggunakan jaket baja bergelombang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa jaket baja bergelombang mempertinggi kekuatan sambungan yang memiliki pola keruntuhan geser dan merubah perilakunya ke lentur daktail. Spesimen yang diperkuat beraksi sebagai bentuk pengekang yang sangat efisien dan meningkatkan regangan desak ultimit beton.

Hasil pengujian juga mengindikasikan bahwa kekuatan geser sambungan yang diberi jaket dapat diestimasi menggunakan suatu pendekatan yang mirip dengan desain yang direkomendasikan untuk sambungan kolom dan balok. Jaket baja bergelombang ternyata efisien untuk rehabilitasi pada struktur yang telah ada dan tidak didesain untuk dengan kebutuhan peraturan seismik.

Hakuto, Park, dan Tanaka (2000) melakukan simulasi beban seismik pada sambungan kolom-balok interior dan eksterior. Pengujian dilakukan terhadap delapan spesimen, yaitu satu spesimen kolom-balok dengan penulangan buruk, yang menggunakan desain seperti bangunan tahun 1970-an. Tiga spesimen yang sama kemudian diberi jaket beton, dengan perbedaan cara memasang tulangan dan kekuatan baja tulangan. Empat spesimen selanjutnya mewakili kolom balok interior dan eksterior yang didesain untuk mengakomodasi beban seismik dengan perbedaan pada diameter tulangan dan kait tulangan transversal.

Hasil pengujian menunjukkan peningkatan performa yang signifikan pada beton yang dipasangi jaket beton baru. Pemasangan jaket terbukti mampu meningkatkan kekakuan, kekuatan, dan daktilitas sambungan kolom-balok beton yang memiliki tulangan buruk. Meskipun masih di bawah kualitas sambungan kolom-balok yang didesain dengan mengakomodasi beban seismik, perbedaannya tidaklah terlalu besar.

Sulendra (2005) melakukan pengujian pada sambungan kolom-balok yang diperkuat dengan pemasangan jaket pada bagian kolom. Jaket beton menggunakan tulangan polos $\phi 6 - 175$ mm yang dibuat atau dibentuk secara spiral. Empat spesimen dibuat dan tiga di antaranya diberi jaket beton yang sama.

Pengujian Sulendra (2005) menunjukkan bahwa jaket beton meningkatkan kemampuan menahan beban geser sampai 80% dari kemampuan awalnya. Metode *jacketing* dan penambahan tulangan lateral terbukti mampu meningkatkan daktilitas kolom. Kekuatan, kekakuan, dan disipasi energi meningkat secara signifikan, tetapi retakan menunjukkan pola yang sama, yaitu kegagalan lentur dengan arah retak 90° pada sambungan kolom-balok, serta retakan geser pada kolom.

Tsonos (2008) melakukan pengujian untuk mengevaluasi sambungan yang diperkuat dengan jaket polimer bertulang serat karbon (CRFP, *carbon fibre reinforced polimer*) dan jaket beton bertulang. Empat buah spesimen identik disiapkan untuk diuji. Spesimen dibuat menggunakan beton dengan berat normal dan penulangan baja ulir (*deform*), mirip dengan struktur bangunan yang telah ada dan dirancang serta dibangun pada tahun 1960-an dan 1970-an.

Pengujian pada dua spesimen kontrol menunjukkan kegagalan geser pada bagian sambungan. Spesimen kontrol yang diuji ini mewakili struktur yang terkena beban gempa sebelum diperkuat.

Kemudian dua spesimen, yang sudah diuji dan belum diuji diperkuat dengan jaket beton. Perkuatan dilakukan pada empat sisi sambungan dengan tambahan tulangan sengkang pada wilayah sambungan dan ikatan tambahan pada kolom. Untuk mendukung tulangan transversal, tulangan longitudinal tambahan ditempatkan pada setiap sudut jaket, dan dilas dengan tulangan kolom yang sudah ada. Untuk meningkatkan ikatan antara beton lama dan baru, serta untuk mengelas tulangan baru ke tulangan lama, selimut beton dikupas dan dipermukaannya diperkasas dengan *sandblasting* ringan.

Spesimen lainnya diperkuat dengan jaket CFRP, metode perbaikannya meliputi pembuangan dan pengisian kembali beton yang hilang dengan injeksi mortar dan pemasangan jaket serat pada daerah sambungan dan kolom. Jaket serat diatur menurut jumlah lapisan, bentuk potongan, dan daerah pemasangan.

Pengujian spesimen menggunakan pembebanan seismik. Spesimen yang belum mengalami perkuatan menunjukkan performa yang rendah terhadap beban siklik. Pada pengujian kembali setelah perbaikan menggunakan jaket beton bertulang atau serat karbon, menunjukkan bahwa kedua teknik tersebut terbukti efektif untuk memberikan sifat yang lebih daktail. Terlihat juga perkuatan jaket beton bertulang yang diberikan terhadap spesimen sebelum gempa lebih inferior dibandingkan jika diberikan kepada spesimen setelah gempa. Terlihat juga

performa struktur yang diperkuat dengan jaket beton bertulang lebih baik daripada yang diperkuat dengan serat karbon.

Tsonos (2010) juga melakukan investigasi pada sambungan kolom balok yang diperkuat dengan jaket beton. Lima buah spesimen sambungan kolom-balok dibuat dan diuji. Satu spesimen kontrol diuji tanpa perlakuan tambahan. Empat spesimen lainnya diuji setelah diperkuat. Dua spesimen diperkuat dengan jaket yang menggunakan beton konvensional seperti yang digunakan pada struktur sebelumnya. Perkuatan diberikan pada empat dan dua sisi. Dua spesimen lainnya diperkuat dengan mortar campuran siap pakai, tidak menyusut (*non-shrink*), rheoplastik, mampu mengalir (*flowable*), dan tak terpisahkan (*non-segregating*) dengan kekuatan tinggi. Perkuatan juga diberikan pada empat dan dua sisi.

Pengujian dilakukan dengan pembebanan seismik. Dari hasil pengujian disimpulkan bahwa perkuatan menggunakan beton konvensional sama baiknya dengan mortar campuran awal. Perkuatan empat dan dua sisi efektif untuk meningkatkan performa sambungan. Tetapi performa mortar campuran awal sedikit lebih baik terutama dalam hal kapasitas disipasi energi dibandingkan beton konvensional.

Gergely, Pantelides, dan Reaveley (2000) melakukan pengujian pada sambungan kolom-balok beton yang diperkuat dengan komposit polimer bertulang serat karbon (CFRP). Spesimen sambungan kolom-balok beton yang diuji berjumlah 14 buah, yang dibagi ke dalam dua kelompok. Kelompok pertama (fase I) yang berjumlah 9 spesimen persiapan permukaan dilakukan dengan menyikat permukaan beton menggunakan sikat kawat. Pada kelompok lainnya

(fase II) yang berjumlah 5 spesimen, proses tersebut dilakukan dengan penyemprotan menggunakan air dan adhesif sruktur. Mutu beton yang digunakan di fase I adalah 20 MPa, sementara pada fase II menggunakan beton 34 MPa.

Dua spesimen dari masing-masing kelompok diuji pada kondisi aslinya, sebelum mengalami perlakuan persiapan permukaan dan perkuatan. Selanjutnya tujuh spesimen sisa dari fase I dan tiga dari fase II diperkuat dengan bungkus lembaran tenunan komposit CFRP. Kolom dibungkus dengan lembaran CFRP di keempat sisinya, sedangkan balok pada tiga sisi, yaitu atas dan kedua sampingnya. Pada masing-masing spesimen, variasi dilakukan pada ukuran panjang lembaran komposit pembungkus kolom dan balok, arah serat, temperatur *curing*, dan persiapan permukaan.

Dari pengujian seismik disimpulkan bahwa pengikatan dengan lembaran komposit CRFP meningkatkan kapasitas geser sambungan secara signifikan. Selain itu, metode ini juga menaikkan kontrol kerusakan total, dan sambungan terbukti memiliki tegangan sisa minimal pada akhir pengujian yang cukup untuk mendukung beban mati. Keruntuhan pada spesimen dasar identik, dengan retak tarik diagonal pada daerah sambungan, yang meluas ke balok di level penulangan longitudinal. Spesimen polimer bertulang serat mencapai beban puncaknya, tetapi karena komposit terdelaminasi, level beban tidak dapat berlanjut. Hal ini menyebabkan kegagalan spesimen pada beban rendah dan lebih berkaitan dengan momen lentur daripada kapasitas elemen.

Li, Samali, Ye, dan Bakoss (2002) melakukan pengujian terhadap model hubungan kolom-balok kompleks dengan perkuatan hibrida plastik bertulang serat

(FRP, *fibre reinforced plastic*). Tiga spesimen rangka beton dengan tulangan baja mewakili sambungan kolom-balok pada umumnya. Dua spesimen tanpa perkuatan FRP, sedangkan lainnya diperkuat dengan hibrida FRP di sekitar sambungan kolom-balok (spesimen FRP). Komposit hibrida terdiri dari tenunan gelas-E, potongan lembaran keset, kain karbon, dan selotip serat karbon.

Pengujian dilakukan dengan pembebanan statik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa desain dengan perkuatan FRP menaikkan kekakuan dan kapasitas beban yang mampu ditahan oleh rangka kolom-balok. Pemakaian FRP juga menunda permulaan retak pada sambungan.

Antonopoulos dan Triantafillou (2003) melakukan investigasi eksperimental terhadap sambungan kolom-balok yang diperkuat dengan polimer bertulang serat (FRP, *fibre reinforced polimer*). Total 18 spesimen yang dibuat dan diuji. Semua spesimen memiliki dimensi yang identik dan bertulang sehingga mewakili sambungan T rangka kolom-balok eksterior. Dua spesimen kontrol diuji apa adanya, dan spesimen lainnya diperkuat dengan kepingan karbon, angkur mekanik *L-shape* yang terbuat dari kaki baja siku yang diikat dengan *epoxy* adhesif, lembaran fleksibel dari serat karbon, serat gelas, dan kombinasinya.

Pengujian dilakukan dengan pembebanan seismik terhadap semua spesimen. Hasil pengujian menunjukkan peran penting angkur mekanik pada pengikatan kembali prematur terbatas, dan memberikan informasi penting tentang peran dari parameter-parameter yang bervariasi, yaitu bagian daerah FRP, distribusi FRP antara balok dan kolom, beban aksial kolom, penulangan

sambungan internal, keruntuhan awal, karbon versus serat gelas, lembaran versus kepingan, dan pengaruh balok transversal.

Prota, Nanni, Mafredi, dan Cosenza (2004) melakukan pengujian terhadap sambungan kolom-balok beton yang diperkuat untuk memperbaiki rangka struktur yang sebelumnya tidak didesain untuk pembebanan seismik. Teknik yang digunakan adalah penggunaan komposit polimer bertulang serat (FRP). Sebelas spesimen berdesain non seismik dicetak dan diuji.

Untuk memperbaiki sambungan kolom-balok beton, digunakan teknik yang berdasarkan pada kombinasi pengikatan eksternal dengan laminasi polimer bertulang serat (FRP) dan batang FRP yang ditanam dekat permukaan (NSM, *near-surface-mounted*). Ikatan laminasi eksternal dapat digunakan untuk mengekang kolom dan meningkatkan daktilitas serta memperbaiki performa desak beton. Laminasi dapat juga digunakan di daerah sambungan dan balok untuk meningkatkan kapasitas geser. Batang NSM digunakan pada kolom untuk meningkatkan kapasitas lentur, dengan menambahkan tulangan tarik tambahan.

Parameter-parameter yang diinvestigasi meliputi tingkat beban aksial konstan pada kolom, jenis perkuatan FRP, dan jumlah perkuatan FRP yang digunakan. Hasil pengujian mengkonfirmasi bahwa variasi jumlah penulangan eksternal (jumlah lapisan dan batang), lokasi (kolom atau kolom plus balok), dan penulangan (laminasi, batang, atau kombinasinya) dapat mengizinkan insinyur untuk memutuskan tingkat hierarki perkuatan dan model keruntuhan yang dapat dicapai sambungan. Daerah sambungan perlu diperkuat untuk memperoleh peningkatan yang signifikan pada kekuatan dan daktilitas.

Alsayed, Al-Salloum, Almusallam, dan Siddiqui (2010) meneliti efisiensi dan *effectiveness* lembaran polimer bertulang serat karbon (CFRP) untuk memperbaharui kekuatan geser dan daktilitas sambungan kolom-balok terhadap kebutuhan seismik. Empat spesimen dibuat dengan desain yang tidak optimal, kekuatan geser sambungan tidak mencukupi dengan membuat tanpa penulangan transversal, untuk mewakili sambungan pada struktur yang telah ada. Dua spesimen digunakan sebagai spesimen kontrol, dan dua spesimen lainnya diperkuat dengan lembaran CFRP melalui dua skema yang berbeda. Pada skema pertama, lembaran CFRP direkatkan dengan epoxy ke bagian sambungan, kolom, dan balok. Pada skema kedua, lembaran CFRP direkatkan hanya pada bagian sambungan tetapi secara efektif ditambahkan dengan pengikatan kembali menggunakan angkur mekanik.

Keempat spesimen kemudian kemudian diuji dengan beban siklik lateral untuk mensimulasikan gempa bumi. Spesimen kontrol kemudian diperbaiki dengan mengisi retaknya menggunakan epoxy dan pengikatan eksternal menggunakan kedua skema di atas. Respon historis spesimen kontrol, yang diperbaiki, dan yang diperkuat, dibandingkan. Hasil dibandingkan melalui degradasi loop histerisis, diagram beban-perpindahan, profil kolom, distorsi geser sambungan, daktilitas, dan kekakuan. Perbandingan menunjukkan bahwa lembaran CFRP sangat efektif untuk meningkatkan tahanan geser dan kapasitas deformasi sambungan kolom-balok eksterior dan menunda degradasi kekakuan.

Ilki, Bedirhanoglu, dan Kumbasar (2011) melakukan investigasi terhadap sambungan kolom-balok beton yang diperkuat dengan tambahan penulangan

transversal dan beton berkekuatan rendah yang dikombinasikan dengan polimer bertulang serat. Spesimen sambungan kolom-balok beton dibuat tanpa menggunakan penulangan transversal pada bagian sambungan. Spesimen terbagi ke dalam dua kelompok. Pada kelompok pertama yang terdiri dari tiga spesimen, dua spesimen kontrol diuji apa adanya. Spesimen ketiga diperkuat dengan menambahkan tulangan transversal pada sambungan dengan teknik pengelasan, kemudian ditutup dengan beton berkekuatan rendah. Pada kelompok kedua, satu spesimen diperbaiki dengan jaket lembaran CFRP, tanpa penambahan tulangan transversal. Sedangkan empat spesimen lainnya diperkuat dengan tulangan transversal tambahan yang dilas, diperbaiki dengan beton berkekuatan rendah dan dibungkus dengan jaket CFRP. Variasi yang diberikan berupa jumlah dan bentuk CFRP dan umur spesimen.

Pengujian dilakukan dengan beban kombinasi aksial dan perpindahan lateral. Dari hasil pengujian terlihat ada dua jenis pambatasan kekuatan pada kelompok pertama. Kekuatan spesimen dengan batang tulangan longitudinal balok cukup mengikat inti sambungan yang terbatas oleh kekuatan geser kolom. Kekuatan kedua spesimen dibatasi juga oleh slip tulangan longitudinal dengan pengaitnya. Pada kelompok kedua, performa yang lebih ditemukan pada parameter kekuatan geser dan daktilitas, menunjukkan bahwa slip tulangan balok dapat dicegah.

Misir dan Kahraman (2013) melakukan pengujian terhadap sambungan kolom-balok beton dengan desain non-seismik yang diperkuat dengan blok SIFCON (*slurry infiltrated fibrous concrete*). SIFCON merupakan komposit *pre-*

fabricated yang digambarkan sebagai komposit semen bertulang serat baja dengan fraksi volume serat berkisar antara 5 – 30%. Sifat-sifat mekanis SIFCON tergolong superior dalam hal kekuatan desak, tarik, geser, dan lentur, serta keuletan yang luar biasa. Kekuatan mekanik dan kapasitas disipasi energi yang tinggi menjadikannya sangat efisien untuk membuat struktur tahan gempa.

Tiga spesimen sambungan eksterior dibuat dengan desain non-seismik. Satu spesimen kontrol, diuji tanpa perkuatan. Dua spesimen lainnya diperkuat dengan pelat dan blok sudut SIFCON menggunakan ankur kimia. Spesimen ketiga menggunakan blok sudut yang lebih tipis dibandingkan dengan spesimen kedua.

Pengujian dilakukan dengan pembebanan seismik. Dari hasil pengujian disimpulkan bahwa perkuatan dengan SIFCON meningkatkan kekakuan dan kekuatan secara signifikan, sekitar dua setengah kali lebih besar dibandingkan spesimen kontrol. Selain itu membuat sambungan memiliki daktilitas yang lebih baik. Kurva histerisis juga mengindikasikan performa disipasi energi yang lebih baik dibandingkan spesimen kontrol. Pola keruntuhan berubah dari kegagalan geser sambungan menjadi kegagalan lentur balok. Skema perkuatan dengan blok sudut yang lebih tipis ternyata lebih efektif dibandingkan yang tebal.

Chaimahawan dan Pimanmas (2009) melakukan pengujian pada sambungan kolom-balok yang diperkuat dengan ekspansi planar segiempat dan segitiga. Program eksperimental terdiri dari tiga spesimen sambungan kolom-balok interior. Satu spesimen tidak diperkuat, spesimen kedua *diretrofit* dengan ekspansi planar beton bertulang berbentuk segiempat, dan spesimen ketiga

berbentuk segitiga. Kolom-balok beton didesain seperti pada struktur umumnya yang sudah ada di Thailand. Jenis bangunan yang digunakan sebagai acuan meliputi gedung sekolah, rumah sakit, kantor pemerintah, dan apartemen, dengan rangka antara 5 – 15 lantai.

Pengujian dilakukan dengan pembebanan seismik, dan diperoleh beberapa kesimpulan. Sambungan kolom-balok yang diretrofit dengan ekspansi planar efektif untuk meningkatkan kekakuan, kekuatan ultimit, disipasi energi, dan daktilitas. Model keruntuhan berubah dari kegagalan geser sambungan menjadi campuran antara kegagalan lentur dan geser pada balok. Reduksi tegangan geser sambungan horizontal secara signifikan diperoleh pada spesimen yang diretrofit sehubungan dengan reduksi regangan batang tulangan longitudinal balok pada muka kolom. Peningkatan rasio kedalaman kolom dengan diameter tulangan yang signifikan juga menguntungkan bagi performa ikatan ankur. Bentuk ekspansi segiempat dan segitiga menghasilkan sifat yang hampir sama. Namun bentuk segiempat lebih efektif untuk menunda keretakan beton pada zona kompresi di balok dan tekuk dari tulangan longitudinal balok. Ekspansi sambungan *post-fabricated* lebih baik dibandingkan dengan konstruksi konvensional, yaitu jika ekspansi planar dibuat bersamaan dengan kolom dan balok. Sehingga metode ini dapat diterapkan pada bangunan baru maupun pekerjaan *retrofit*. Tetapi metode ini juga memiliki keterbatasan, yaitu kemungkinan menghasilkan kegagalan geser yang tak diinginkan pada balok dan kolom sehubungan dengan ukuran yang diperpendek.

Pimanmas dan Chaimahawan (2010) menguji perbesaran planar sambungan kolom-balok untuk menambah kekuatan geser. Lima spesimen diuji dengan pembebanan quasi-statik. Spesimen pertama adalah sambungan kolom-balok tanpa perbesaran ukuran sebagai spesimen kontrol. Spesimen kedua sambungan kolom-balok dengan ekspansi segiempat di keempat sudutnya, yang dibuat bersamaan. Tiga spesimen terakhir menggunakan perkuatan ekspansi planar segitiga, yang dibuat disusulkan kemudian, mewakili perkuatan pada struktur yang telah ada. Variasi ekspansi adalah ukuran segitiga, yang dipasang di atas penebalan bagian kolom dan balok. Semua spesimen memiliki bentuk menyilang antara kolom dan balok, dengan perkuatan diberikan pada empat sudut sambungan.

Setelah melalui pengujian quasi-statik diperoleh kesimpulan bahwa perbesaran sambungan merupakan metode yang efektif untuk mengurangi tegangan geser yang ditransmisikan ke panel sambungan. Disipasi energi meningkat secara signifikan karena petunjuk loop histerisis yang lebih luas. Model keruntuhan berubah dari kegagalan geser sambungan menjadi kegagalan lentur balok. Banyak parameter yang mempengaruhi desain perbesaran sambungan, seperti ukuran, kekuatan penulangan dan material balok, kolom dan panel sambungan.

Pimanmas dan Chaimahawan (2011) melakukan pengujian yang hampir sama terhadap sambungan kolom-balok dengan perbesaran. Lima spesimen dibuat dan diuji seperti pengujian sebelumnya. Namun pada perkuatan sambungan

dengan ekspansi planar, ditambahkan *non-shrink grout* untuk merekatkan beton retrofit dengan sambungan kolom-balok, tetapi hanya pada sisi bawah balok saja.

Pengujian dilakukan dengan pembebanan seismik. Kesimpulan yang diperoleh adalah, teknik ini efektif untuk menurunkan tegangan geser yang ditransmisikan ke panel sambungan, disipasi energi meningkat secara signifikan, model keruntuhan berubah dari kegagalan geser sambungan menjadi kegagalan lentur balok, dan engsel plastis bergerak dari muka kolom ke ujung perbesaran.

