

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Daktilitas merupakan karakteristik fundamental dalam perilaku struktur yang mencerminkan kemampuan suatu elemen untuk mengalami deformasi signifikan dalam kondisi inelastis tanpa mengalami kegagalan mendadak Filaj et al. (2016). Karakteristik ini hanya dapat dicapai jika material penyusun memiliki sifat daktil, suatu sifat yang secara alami tidak dimiliki oleh beton karena sifat getasnya. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme perkuatan tambahan untuk meningkatkan daktilitas beton. Salah satu metode yang umum diterapkan adalah penggunaan tulangan baja, yang memiliki sifat daktil dan mampu menahan regangan besar sebelum mengalami kegagalan. Selain itu, konfigurasi tulangan transversal, seperti sengkang atau spiral, juga berperan krusial dalam meningkatkan daktilitas elemen struktural dengan mengurangi potensi kegagalan geser serta mempertahankan integritas beton di sekitar tulangan longitudinal.

Sheikh dan Uzumeri (1980) mengembangkan konsep "area efektif inti terkekang", yang mengacu pada bagian beton yang benar-benar mengalami efek pengekangan akibat keberadaan tulangan transversal. Konsep ini menjadi dasar dalam memahami kontribusi pengekangan terhadap peningkatan daktilitas kolom. Efektivitas pengekangan sangat bergantung pada konfigurasi tulangan transversal, jarak antar sengkang, serta sifat mekanis material yang digunakan. Keberadaan pengekangan lateral berfungsi untuk menahan ekspansi lateral akibat beban aksial, sehingga meningkatkan kapasitas deformasi dan ketahanan struktur terhadap siklus pembebanan berulang.

Dalam penelitian lainnya, Park dan Paulay (1975) menegaskan bahwa desain struktur beton bertulang dengan daktilitas tinggi sangat bergantung pada kapasitas disipasi energi yang memadai, terutama untuk elemen struktural yang mengalami pembebanan siklik, seperti sistem bangunan tahan gempa. Studi mereka menunjukkan bahwa konfigurasi tulangan transversal yang optimal, termasuk jumlah serta jarak antar tulangan, berkontribusi signifikan dalam meningkatkan kapasitas elemen struktural untuk menahan deformasi inelastis tanpa mengalami degradasi kekuatan yang signifikan.

Lebih lanjut, Mander et al. (1988) mengembangkan model konstitutif untuk beton bertulang dengan mempertimbangkan pengaruh tekanan lateral akibat tulangan transversal. Model ini menunjukkan bahwa peningkatan rasio volumetrik tulangan transversal berimplikasi pada peningkatan ketahanan struktur terhadap kegagalan akibat beban siklik serta meningkatkan kapasitas beton dalam menahan regangan plastis yang lebih besar sebelum mencapai titik keruntuhan. Oleh karena itu, strategi desain yang mempertimbangkan interaksi antara tulangan longitudinal dan transversal menjadi faktor kunci dalam meningkatkan daktilitas struktur beton bertulang, terutama dalam menghadapi kondisi pembebanan ekstrem.

Eksplorasi terhadap berbagai bentuk kolom dan konfigurasi tulangan transversal terus menjadi fokus penelitian dalam upaya meningkatkan efektivitas pengekanan pada struktur beton bertulang. Berbagai studi telah menganalisis bentuk kolom, seperti persegi, bulat, dan persegi panjang, serta variasi pola pemasangan dan jarak sengkang yang digunakan sebagai tulangan transversal. Tujuan utama dari penelitian-penelitian ini adalah mengidentifikasi kombinasi

bentuk dan konfigurasi tulangan yang paling optimal dalam meningkatkan kekuatan tekan, daktilitas, serta ketahanan terhadap beban lateral. Dengan demikian, pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan kinerja struktural yang lebih baik, terutama dalam kondisi pembebanan dinamis akibat gempa bumi atau beban siklik lainnya.

Penelitian terkait penggunaan konsep kolom dengan sengkang lapis ganda pertama kali dilakukan oleh L. Z. Sun et al. (2011). Penelitian ini membahas karakteristik pembebanan kolom beton persegi yang dikekang dengan sengkang berlapis ganda. Penggunaan sengkang secara efektif meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom beton akibat efek pengekangan lateral yang ditimbulkan. Penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa faktor-faktor seperti kekuatan, diameter, dan jarak sengkang berpengaruh signifikan terhadap kinerja kompresi aksial kolom beton yang dikekang. Meskipun banyak penelitian sebelumnya lebih fokus pada penggunaan sengkang tunggal, penelitian ini memperluas pemahaman mengenai pengaruh penggunaan sengkang lapis ganda. Model perhitungan kapasitas beban dikembangkan dan diuji melalui serangkaian pengujian beban aksial pada 16 spesimen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan sengkang berlapis ganda tidak hanya meningkatkan kapasitas beban tetapi juga memperbaiki karakteristik dan daktilitas komponen beton, sehingga memberikan referensi penting untuk desain dan aplikasi dalam rekayasa struktur tahan gempa.

Yang et al. (2015) mengembangkan desain kolom beton mutu tinggi (HSC) dengan sengkang ganda berbahan baja berkekuatan tinggi untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas, terutama dalam kondisi gempa atau beban aksial tinggi.

Desain ini membagi penampang beton menjadi tiga zona: beton tidak terkekang, beton terkekang tunggal, dan beton terkekang ganda, yang masing-masing mencapai kekuatan puncak pada tingkat regangan yang berbeda. Studi eksperimental mereka menunjukkan bahwa penggunaan sengkang berupa spiral ganda dalam kolom HSC secara signifikan meningkatkan kapasitas beban dan deformasi sebelum kegagalan dibandingkan desain konvensional. Model tegangan-regangan yang dikembangkan oleh Saatcioglu dan Razvi (1992) dimodifikasi dalam penelitian ini untuk mempertimbangkan rasio tulangan transversal ekuivalen dan tekanan lateral efektif akibat penggunaan sengkang ganda. Studi parametrik yang dilakukan menunjukkan bahwa peningkatan rasio tulangan transversal dan diameter sengkang bagian dalam berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan serta daktilitas. Namun, peningkatan kuat tekan beton cenderung mengurangi rasio peningkatan kekuatan dan daktilitas. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan sengkang ganda pada kolom HSC dapat menjadi solusi efektif dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban aksial maupun beban siklik.

Wu et al. (2016) mengusulkan desain kolom beton bertulang dengan dua lapisan sengkang untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas pada struktur di zona seismik. Penelitian ini menekankan peran pengekan lateral dalam meningkatkan kapasitas beban aksial dan deformasi plastis, terutama pada kolom dengan rasio beban aksial tinggi. Pengujian terhadap 15 kolom dengan dua konfigurasi sengkang—kombinasi sengkang persegi dan lingkaran serta dua sengkang persegi—menunjukkan peningkatan signifikan dalam ketahanan struktur dibandingkan desain konvensional. Model tegangan-regangan yang dikembangkan juga

menunjukkan akurasi tinggi dalam memprediksi respons tegangan-regangan kolom. Temuan ini mengindikasikan bahwa sengkang ganda mampu mengendalikan retak, mencegah tekuk dini dari tulangan longitudinal, serta meningkatkan ketahanan kolom terhadap beban aksial.

Kumar et al. (2019) melakukan studi eksperimental mengenai kolom beton bertulang dengan dua lapis tulangan transversal untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitasnya. Penelitian ini membandingkan tiga macam pengekangan: kolom dengan pengekangan ganda, pengekangan tunggal, dan tanpa pengekangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan dua lapis sengkang menghasilkan efek pengekangan yang lebih efektif dibandingkan sengkang tunggal. Eksperimen dilakukan pada 63 spesimen kolom pendek beton bertulang dengan berbagai variabel, termasuk kuat tekan beton, bentuk dan jarak tulangan transversal, serta rasio kedekatan antara lapisan pengekangan dalam dan luar. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan lapisan pengekangan dalam meningkatkan kekuatan puncak dan regangan puncak hingga 14% dan 50% untuk beton mutu M30, serta 8% dan 45% untuk beton mutu M60. Selain itu, spesimen dengan inti spiral menunjukkan efisiensi pengekangan tertinggi dibandingkan bentuk lainnya. Temuan ini menegaskan bahwa semakin kecil jarak antara lapisan pengekangan dalam dan luar, semakin optimal kapasitas beban yang dapat ditahan oleh kolom.

BAB III

LANDASAN TEORI

A. Kolom Beton Bertulang

Kolom beton bertulang merupakan elemen struktural vertikal yang penting dalam konstruksi bangunan. Di sini, kolom berfungsi untuk menyalurkan beban dari struktur atas ke elemen struktural lainnya, seperti fondasi. Kolom persegi atau persegi panjang, yang merupakan salah satu bentuk yang paling umum digunakan, menawarkan stabilitas yang baik dan mudah dikerjakan. Kolom beton bertulang terbuat dari campuran beton sebagai bahan utama yang berfungsi untuk menahan gaya tekan, sedangkan tulangan baja digunakan untuk menahan gaya tarik. Dengan kombinasi ini, kolom mampu menahan beban struktural yang lebih besar dan mendistribusikan beban secara merata ke elemen struktural di bawahnya (SNI-2847-2019).

Perilaku mekanis kolom tergantung pada jenis beban yang diterima, terutama beban aksial dan lateral. Beban aksial merupakan beban yang bekerja sejajar dengan sumbu kolom, sedangkan beban lateral merupakan beban yang bekerja secara tegak lurus dengan sumbu kolom, seperti misalnya disebabkan oleh beban angin atau gempa bumi. Ketika kolom menerima beban aksial yang berlebihan, terdapat risiko mekanisme tekuk (*buckling*), di mana kolom kehilangan stabilitas dan mengalami deformasi lateral (Mander et al., 1988). Kapasitas dukung beban kolom juga ditentukan oleh interaksi antara gaya aksial dan momen lentur yang dihasilkan oleh beban yang

diterima kolom. Hubungan tersebut sering digambarkan dalam diagram interaksi gaya aksial – momen lentur (*P-M Interaction Diagram*), yang menunjukkan batas kapasitas kolom untuk menahan kombinasi beban Nilson et al. (2010). Kolom perlu dirancang untuk dapat menghindari kegagalan struktural dan mempertahankan daya dukung beban dalam batas aman.

B. Peranan Sengkang pada Kolom Beton Bertulang

Sengkang merupakan elemen yang penting dalam struktur beton bertulang, khususnya pada kolom. Sengkang umumnya berbentuk tulangan baja lingkaran atau segi empat dan dipasang melintang di sekitar tulangan longitudinal pada kolom. Sengkang berfungsi untuk mencegah kegagalan geser dan meningkatkan daktilitas kolom. Fungsi utama sengkang adalah untuk menahan gaya geser yang terjadi pada kolom, terutama ketika beban lateral seperti yang disebabkan oleh gempa bumi atau angin bekerja pada struktur. Tanpa sengkang, kolom dapat mengalami kegagalan geser, yaitu jenis keruntuhan yang terjadi apabila tegangan geser melebihi kapasitas material beton (Park & Paulay, 1975).

Selain itu, sengkang juga berperan dalam meningkatkan daktilitas kolom. Daktilitas merupakan kemampuan suatu material atau elemen struktural untuk mengalami deformasi plastis sebelum pada akhirnya mengalami kegagalan total. Pada kolom beton bertulang, sengkang membatasi pergerakan dari tulangan utama dan beton inti agar tidak bergerak keluar dari posisi yang seharusnya ketika kolom mengalami beban ekstrem seperti gempa bumi. Dengan demikian, sengkang membantu menjaga

stabilitas struktural dan meningkatkan kapasitas deformasi kolom, yang mana sangat penting dalam mencegah keruntuhan mendadak akibat tekuk atau kegagalan geser (Mander et al., 1988). Perencanaan sengkang yang tepat memungkinkan struktur memiliki kinerja yang lebih baik dalam menahan beban dinamis seperti beban gempa, di mana daktilitas merupakan faktor kunci untuk keberlanjutan bangunan.

C. Hukum Konstitutif untuk Beton dan Baja

Hukum konstitutif merupakan hubungan matematis yang menggambarkan bagaimana suatu material merespons tegangan dan regangan yang dikenakan padanya. Untuk beton dan baja sebagai material utama dalam struktur beton bertulang, hukum konstitutif sangat penting dalam menganalisis kekuatan, keandalan, dan perilaku deformasi struktur.

Beton merupakan material komposit yang memiliki sifat mekanik yang kompleks, termasuk perilaku nonlinier seperti retak (*cracking*), *crushing*, dan tegangan leleh (*yielding*). Beton sangat kuat dalam menahan gaya tekan tetapi lemah dalam menahan gaya tarik, sehingga cenderung mengalami retak ketika gaya tarik atau momen lentur melebihi kapasitas tariknya. Ketika gaya tekan melebihi kekuatan tekan beton (f'_c), material akan mengalami *crushing*, yang ditandai dengan kerusakan permanen akibat kehancuran struktur mikro beton (Mander et al., 1988). Beton juga memiliki sifat nonlinear, di mana pada tahap awal, beton berperilaku elastis, tetapi saat mendekati kekuatan puncaknya, terjadi peningkatan deformasi permanen hingga akhirnya gagal.

Di sisi lain, baja tulangan memainkan peran penting dalam meningkatkan kekuatan tarik beton. Sifat mekanik baja tulangan sering digambarkan oleh kurva tegangan-regangan bilinear. Pada tahap awal, baja berperilaku elastis linier hingga mencapai tegangan leleh (f_y), di mana baja mulai mengalami deformasi plastis yang signifikan tanpa peningkatan tegangan yang besar. Pada tahap ini, baja menahan gaya tarik akibat momen lentur, meningkatkan kapasitas tarik struktur beton bertulang (Nilson et al., 2010).

Dalam simulasi numerik, model konstitutif digunakan untuk menggambarkan perilaku beton dan baja. Model konstitutif yang umum untuk beton adalah Drucker-Prager Model atau *Concrete Damage Plasticity Model*, yang mempertimbangkan beban aksial, retak, dan *crushing* secara nonlinear (Abaqus/CAE User's Guide ABAQUS 2016, n.d.). Sedangkan untuk baja tulangan, model elastis-plastis bilinear digunakan untuk menggambarkan transisi dari regangan elastis ke plastis tanpa banyak peningkatan tegangan.

a. Hukum konstitutif untuk beton

1) Perilaku beton dalam tekanan

Perilaku beton dalam tekanan umumnya dimodelkan dengan kurva tegangan-regangan parabola, seperti model Hognestad (1951):

$$\sigma_c = f'_c \left(\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \dots\dots\dots (1)$$

untuk $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0$ di mana:

- σ_c : tegangan beton (MPa)

- f'_c : kuat tekan beton (MPa)
- ε_0 : regangan pada kuat tekan puncak

Apabila nilai regangan melebihi ε_0 , beton akan mengalami *softening*, yang menyebabkan penurunan tegangan hingga kegagalan.

Dalam kondisi terkekang, kekuatan tekan beton meningkat. Hubungan antara kuat tekan beton terkekang (f'_{cc}) dan tekanan lateral (f_l) dapat dirumuskan oleh Mander et al. (1988) sebagai:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

dengan k sebagai faktor pengaruh pengekangan.

2) Perilaku beton dalam tarikan

Beton memiliki kekuatan tarik yang rendah dan sering mengalami retak pada tegangan tarik kecil. Model hubungan tegangan-regangan tarik biasanya dinyatakan sebagai:

$$\sigma_t = E_c \cdot \varepsilon_t, \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cr} \dots\dots\dots (3)$$

dengan ε_{cr} sebagai regangan batas retak. Setelah beton mengalami keretakan, tegangan turun drastis, menyebabkan beton tidak mampu menahan beban tarik tanpa bantuan tulangan baja.

b. Hukum Konstitutif untuk Baja

1) Tahap elastis (Hooke's Law)

Pada tahap awal, baja mengikuti Hukum Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (4)$$

dengan:

- σ : tegangan baja (MPa)
- E : modulus elastisitas baja
- ε : regangan baja

2) Tahap plastis (*Yielding* dan *Strain Hardening*)

Ketika tegangan mencapai tegangan leleh (f_y), baja mulai mengalami deformasi plastis, yang dapat dijelaskan oleh model bilinear:

$$\sigma = f_y + E_t(\varepsilon - \varepsilon_y), \text{ untuk } \varepsilon > \varepsilon_y \dots\dots\dots (5)$$

dengan:

- E_t : modulus regangan plastis (lebih kecil dari E)
- $\varepsilon_y : f_y/E$ = regangan pada titik leleh

Pada regangan lebih tinggi, baja mengalami strain hardening, yang dapat dimodelkan dengan persamaan Ramberg-Osgood:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{f_y} \right)^n \dots\dots\dots (6)$$

dengan α dan n adalah konstanta material.

D. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*) dalam Analisis Struktur dan Pertimbangan Efek *Bond-Slip*

Metode Elemen Hingga (FEM) adalah metode numerik yang umum digunakan dalam menganalisis perilaku struktur dengan membaginya menjadi unsur-unsur yang lebih kecil yang terhubung pada simpul (*node*). Metode ini sangat efektif untuk struktur dengan geometri yang kompleks, beban yang tidak merata, dan sifat material yang nonlinier. Salah satu perangkat lunak yang

paling banyak digunakan untuk analisis FEM adalah Abaqus, yang dikenal dengan kemampuannya yang kuat dalam memodelkan bahan nonlinier seperti beton dan baja tulangan. Abaqus dapat secara akurat menghitung kapasitas beban maksimum dan memprediksi titik kegagalan, menjadikannya alat yang andal untuk menganalisis struktur beton bertulang (RC).

Dalam pemodelan struktur RC menggunakan Abaqus, interaksi antara tulangan beton dan baja memainkan peran penting dalam bagaimana tegangan dan deformasi didistribusikan. Salah satu tantangan utama dalam interaksi ini adalah memodelkan *slip* antara batang tulangan dan beton di sekitarnya, yang dikenal sebagai efek *bond-slip*. Pemodelan perilaku ini secara eksplisit bisa sangat kompleks dan memakan waktu. Untuk menyederhanakan proses tersebut, penelitian ini menggunakan metode yang diusulkan oleh Mohemmi et al. (2020), yang memungkinkan efek *bond-slip* dimasukkan ke dalam model tanpa simulasi antarmuka yang terperinci. Dalam studi mereka, penulis menyoroti bahwa mengasumsikan ikatan sempurna (*perfect bonding*) antara beton dan baja dapat menyebabkan kekakuan dan kekuatan yang terlalu tinggi, terutama dalam kondisi pembebanan yang ekstrem.

Sebaliknya, mereka memperkenalkan faktor reduksi kekuatan untuk mewakili penurunan efektivitas baja karena degradasi ikatan. Faktor ini didasarkan pada data dari uji penarikan dan membantu menyimulasikan efek selip dengan mengurangi kekuatan tarik tulangan. Meskipun mereka menyarankan nilai referensi 0,6 untuk jenis bahan dan ukuran batang tertentu, faktor tersebut harus dihitung ulang menggunakan rumus yang disediakan

dalam penelitian mereka ketika diameter dan kekuatan baja yang berbeda digunakan.

Dalam penelitian tersebut, metode ini diuji melalui simulasi dua sub-rangka dari bangunan beton bertulang sepuluh lantai. Hasilnya menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data eksperimental, menunjukkan bahwa metode tersebut efektif dan praktis. Pendekatan ini memberikan cara yang efisien untuk memasukkan perilaku ikatan-slip dalam simulasi struktural dan membantu meningkatkan akurasi pemodelan beton bertulang.

Untuk menilai secara kuantitatif pengaruh efek *bond-slip* pada daya dukung beban elemen beton bertulang, dua kapasitas beban yang berbeda didefinisikan: $F_{max,1}$, mewakili kapasitas beban dalam kondisi *bond-slip*, dan $F_{max,2}$, mewakili kapasitas beban teoretis di bawah asumsi ikatan sempurna (*perfect bonding*). Rumus berikut telah diusulkan untuk menghitung nilai-nilai ini berdasarkan bahan karakteristik dan parameter geometris.

Kapasitas beban dalam kondisi *bond-slip*, $F_{max,1}$, dihitung dengan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Moheemmi et al. (2020):

$$F_{max,1} = \tau_{max} \cdot \pi \cdot L \cdot d \dots\dots\dots (7)$$

$$\tau_{max} = 2.5\sqrt{f_c} \dots\dots\dots (8)$$

Dalam hal ini, panjang penanaman tulangan dalam beton, L , ditentukan sebesar lima kali diameter tulangan yang digunakan, yaitu $L=5d$. Sementara itu, d menyatakan diameter tulangan yang tertanam dalam beton, dan f_c adalah kuat tekan beton yang digunakan sebagai parameter karakteristik dalam perhitungan kekuatan ikatan.

Kemudian, kapasitas beban maksimum teoretis dalam kondisi ikatan sempurna, $F_{max.2}$, ditentukan oleh persamaan yang diusulkan oleh Mohemmi et al. (2020):

$$F_{max.2} = \sigma_{yield} \cdot A_s \dots \dots \dots (9)$$

di mana σ_{yield} adalah kuat leleh baja tulangan dan A_s adalah luas penampang baja tulangan.

Untuk mengukur pengurangan kapasitas beban karena *bond-slip*, faktor reduksi kekuatan, C , diperkenalkan dalam persamaan yang diusulkan oleh Mohemmi et al. (2020):

$$C = \frac{F_{max.1}}{F_{max.2}} \dots \dots \dots (10)$$

Faktor ini berfungsi sebagai indikator penting dalam menilai penurunan kapasitas struktural akibat efek *bond-slip* dan memberikan dasar bagi pendekatan desain yang lebih akurat dalam sistem beton bertulang.

E. Kegagalan Struktural pada Kolom Beton Bertulang

Kolom beton bertulang dapat mengalami berbagai jenis kegagalan tergantung pada beban yang dialaminya dan kondisi material penyusunnya. Salah satu jenis kegagalan yang umum adalah kegagalan geser. Kegagalan ini biasanya terjadi ketika gaya geser yang bekerja pada kolom melebihi kapasitas geser dari beton dan tulangan geser (sengkang) sehingga menyebabkan retakan diagonal pada tubuh kolom. Kegagalan geser seringkali tiba-tiba dan berbahaya, karena kolom dapat runtuh tanpa deformasi yang signifikan sebagai peringatan Park & Paulay (1975).

Jenis kegagalan lainnya adalah tekuk (*buckling*), yang terjadi ketika kolom mengalami beban aksial yang berlebihan, terutama pada kolom ramping. Tekuk terjadi ketika kolom kehilangan stabilitas lateral, di mana deformasi lateral yang besar terjadi sebelum mencapai kekuatan tekan maksimum. Kegagalan ini biasanya dipengaruhi oleh geometri kolom, rasio panjang terhadap diameter, dan kapasitas dukung lateral yang ada (Nilson et al., 2010).

Selain itu, kolom juga dapat mengalami kerusakan atau kegagalan beton akibat kegagalan tekan. Kegagalan ini terjadi ketika beton mencapai kekuatan tekan maksimumnya sehingga menyebabkan beton hancur atau tertekan secara signifikan. Kegagalan ini umumnya terjadi pada kolom pendek yang mengalami beban aksial yang tinggi, dan ditandai dengan kerusakan pada material beton di area dengan konsentrasi tegangan tertinggi. Kegagalan ini dapat diperburuk apabila tidak terdapat cukup tulangan untuk menahan gaya tarik yang dihasilkan selama proses penekanan. (Mander et al., 1988)