

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Kajian mengenai penggunaan bambu sebagai material tulangan dalam beton bertulang telah banyak dilakukan dalam lima tahun terakhir. Fokus utama penelitian-penelitian tersebut adalah mengevaluasi perilaku mekanik bambu sebagai tulangan alternatif baja dalam elemen beton, baik sebagai tulangan tarik maupun tekan. Penelitian ini menjadi penting mengingat bambu merupakan material alami yang memiliki kekuatan tarik tinggi, ketersediaan yang melimpah, serta ramah lingkungan. Namun demikian, kemampuan bambu dalam menahan gaya tekan dan kontribusinya terhadap kapasitas lentur total balok masih menjadi isu yang perlu diteliti lebih lanjut secara teoritis.

Penelitian oleh Kurniati & Saputro (2024) dalam Jurnal Karkasa meneliti Evaluasi Kuat Lentur Beton Bertulang Bambu melalui serangkaian pengujian laboratorium terhadap balok beton dengan tulangan bambu petung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat lentur beton bertulang bambu mampu mencapai rata-rata 4,12 MPa, sedikit lebih tinggi dibanding beton tanpa tulangan bambu sebesar 3,89 MPa. Hal ini membuktikan bahwa bambu berpotensi meningkatkan kapasitas lentur beton. Penelitian ini juga menyoroti pentingnya rasio tulangan, distribusi batang bambu, serta perlakuan permukaan terhadap peningkatan kekuatan lekat antara bambu dan beton. Meskipun fokus penelitian masih terbatas pada tulangan tarik, temuan ini memberikan dasar empiris bagi analisis teoritis kontribusi bambu dalam menahan gaya tekan pada balok berpenampang kecil.

Selanjutnya, Maharani & Patria (2025) dalam Jurnal Area Karst Akkasia mengkaji Analisis Kuat Bambu Petung sebagai Tulangan Beton dan menyoroti bahwa kekuatan lekatan antara bambu dan beton sangat dipengaruhi oleh kadar air bambu, densitas serat, serta perlakuan awal seperti pengeringan atau pelilitan kawat baja. Penelitian ini menegaskan bahwa perlakuan permukaan mampu meningkatkan kekuatan lekat dan mengurangi slip antara bambu dan beton hingga

18%. Temuan ini sangat relevan bagi studi teoritis karena ikatan antarmuka (bond stress) memengaruhi efektivitas tulangan tekan dalam mentransfer gaya antara beton dan bambu. Dengan lekatan yang baik, tulangan bambu tidak hanya berfungsi pada zona tarik tetapi juga dapat berkontribusi terhadap penambahan kapasitas momen ultimit pada zona tekan.

Studi eksperimental oleh Candra Prayoga et al. (2023) dalam *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil* meneliti “Perbandingan Kuat Lentur Balok Beton dengan Variasi Jumlah Tulangan Tekan.” Penelitian ini membandingkan dua tipe balok: BT (tanpa tulangan tekan) dan BN (dengan dua batang tulangan tekan D13). Hasilnya menunjukkan bahwa balok dengan tulangan tekan memiliki kapasitas lentur 5,758% lebih tinggi. Meski peningkatan relatif kecil, hasil ini mempertegas peran tulangan tekan dalam memperlambat retak awal dan meningkatkan kapasitas ultimit.

Selain itu, Irawan & Choiri Windari (2025) dalam *J-INNOVATIVE: Journal of Social Science Research* meneliti pengaruh penambahan tulangan bambu pada beton untuk berbagai variasi rasio tulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar rasio bambu terhadap volume beton, semakin tinggi pula nilai beban maksimum yang mampu ditahan balok. Hal ini menunjukkan adanya kontribusi nyata tulangan bambu terhadap peningkatan kekuatan lentur total. Namun, penelitian ini juga mengingatkan bahwa bambu mudah mengalami deformasi pada zona tekan sehingga diperlukan analisis teoritis lebih lanjut untuk menentukan batas optimum rasio tulangan tekan bambu terhadap kapasitas lentur balok.

Dari penelitian-penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian-penelitian terdahulu telah berhasil membuktikan potensi bambu dalam meningkatkan kapasitas lentur beton, baik melalui peningkatan kuat lekat, perlakuan permukaan, maupun pengaturan rasio tulangan. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada bambu sebagai tulangan tarik, sedangkan kontribusinya sebagai tulangan tekan, terutama pada balok penampang kecil, masih belum banyak dikaji. Celah penelitian inilah yang menjadi dasar dari penelitian ini, yaitu melakukan analisis teoritis kontribusi tulangan bambu sebagai

tulangan tekan terhadap kapasitas lentur balok penampang kecil, dengan mempertimbangkan rasio tulangan, serta perilaku nonlinier material bambu di zona tekan.

2.2. Landasan Teori

2.2.1 Beton

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan karena kemampuannya dibentuk sesuai kebutuhan, memiliki kekuatan tekan tinggi, serta tahan terhadap pengaruh lingkungan. Beton tersusun atas campuran semen, air, agregat halus, agregat kasar, dan bahan tambahan (admixture) yang setelah proses hidrasi akan mengeras menjadi massa padat. Dalam penggunaannya pada struktur bangunan, beton memiliki kelemahan utama yaitu lemah terhadap gaya tarik, sehingga pada elemen yang menahan beban lentur seperti balok atau pelat, beton perlu dikombinasikan dengan baja tulangan yang berfungsi menahan gaya tarik (Indriana Embunsari et al., 2021).

Kinerja beton dipengaruhi oleh beberapa sifat mekanik utama. Kuat tekan (f'_c) menjadi parameter paling penting dalam menilai kualitas beton, karena menunjukkan kemampuan beton menahan beban tekan hingga batas keruntuhan. Nilai f'_c sangat bergantung pada rasio air-semen, kualitas agregat, dan metode perawatan setelah pengecoran. Modulus elastisitas (E_c) menggambarkan tingkat kekakuan beton, di mana nilai E_c berbanding lurus dengan akar kuadrat dari kuat tekan beton. Beton dengan f'_c tinggi memiliki kekakuan yang lebih besar, sehingga deformasi yang terjadi akibat beban akan lebih kecil (Editorial, 2021). Selain itu, sifat rangkak dan susut pada beton juga berpengaruh terhadap perilaku struktur jangka panjang. Retak dan deformasi akibat susut atau rangkak perlu diperhitungkan dalam desain agar struktur tetap memenuhi kriteria layanan selama masa pakai (Indriana Embunsari et al., 2021).

Beton dapat diklasifikasikan berdasarkan berat jenis, fungsi, maupun kinerja khususnya. Berdasarkan berat jenisnya, beton dibedakan menjadi beton ringan, beton normal, dan beton berat. Berdasarkan fungsinya, terdapat beton struktural yang menahan beban dan beton non-struktural yang berfungsi dekoratif. Sedangkan menurut kinerjanya, dikenal beton mutu tinggi, self-compacting

concrete, dan beton tahan api. Faktor-faktor seperti rasio air-semen, kualitas agregat, metode pemadatan, serta proses curing sangat berpengaruh terhadap kekuatan akhir beton. Kekuatan yang optimal hanya dapat dicapai apabila seluruh tahapan produksi beton dilakukan secara benar dan terkontrol.

2.2.2 Balok beton bertulang

Balok beton bertulang merupakan salah satu elemen struktural utama pada bangunan yang berfungsi menyalurkan beban dari pelat lantai atau atap ke kolom dan dinding penopang. Dalam kondisi lentur, bagian atas balok mengalami gaya tekan, sedangkan bagian bawah mengalami gaya tarik. Karena beton memiliki kuat tarik yang rendah, baja tulangan dipasang pada zona tarik untuk menahan gaya tersebut (Editorial, 2021).

Perilaku lentur balok beton bertulang terdiri atas tiga tahap utama. Tahap pertama adalah tahap elastis, di mana seluruh penampang bekerja secara linier terhadap beban yang diberikan. Tahap kedua adalah tahap retak awal, di mana beton pada zona tarik mulai retak dan gaya tarik dialihkan seluruhnya ke baja tulangan. Tahap terakhir adalah tahap plastis, ketika baja tulangan mulai leleh dan beton di zona tekan mendekati keruntuhan. Kondisi desain yang diinginkan adalah *under-reinforced section*, di mana baja tulangan leleh terlebih dahulu sebelum beton hancur sehingga struktur bersifat daktil (Indriana Embunsari et al., 2021).

Kapasitas momen meningkat dengan bertambahnya luas tulangan tarik, namun jika terlalu banyak (*over-reinforced*), struktur menjadi getas. Oleh karena itu, perancangan harus menjaga agar rasio tulangan tetap di bawah batas maksimum menurut SNI 2847:2019 (Journal, 2022). Dimensi penampang dan efek ukuran penampang yang lebih besar tidak selalu memberikan peningkatan kekuatan yang proporsional karena efek ukuran (*size effect*). Semakin besar penampang, distribusi tegangan menjadi tidak merata (Indriana Embunsari et al., 2021). Kuat tekan beton (f'_c) menentukan besarnya tegangan maksimum di zona tekan; semakin tinggi f'_c , semakin besar kapasitas lentur yang dapat dicapai (Matriks Teknik Sipil Editorial, 2021).

Secara umum, balok beton bertulang dapat diklasifikasikan berdasarkan letak tulangan, fungsi struktur, dan sistem penyaluran beban, yaitu sebagai berikut:

1. Balok Bertulangan Tunggal (*Singly Reinforced Beam*)

Balok jenis ini hanya memiliki tulangan baja pada zona tarik. Biasanya digunakan apabila kapasitas lentur yang dibutuhkan masih dapat dipenuhi tanpa perlu menambah tulangan tekan. Balok bertulangan tunggal sederhana digunakan pada struktur dengan tinggi penampang yang mencukupi untuk menahan momen lentur (Journal, 2022).

2. Balok Bertulangan Rangkap (*Doubly Reinforced Beam*)

Balok ini memiliki tulangan baja pada zona tarik (As) dan zona tekan (As'). Penambahan tulangan tekan dilakukan jika tinggi balok dibatasi atau diperlukan peningkatan kapasitas momen tanpa memperbesar dimensi. Jenis ini umum digunakan pada struktur dengan keterbatasan arsitektural atau kebutuhan kapasitas lentur tinggi (Editorial, 2021).

3. Balok Bertulangan Prategang (*Prestressed Concrete Beam*)

Balok ini dibuat dengan memberikan gaya tekan awal pada baja prategang sehingga mengimbangi gaya tarik akibat beban kerja. Balok prategang digunakan pada bentang panjang, seperti jembatan atau gedung bertingkat tinggi, karena mampu mengurangi lendutan dan retak awal.

4. Balok Bertulangan Komposit (*Composite Beam*)

Balok ini terdiri dari kombinasi bahan beton dan baja struktural, misalnya profil baja yang diisi beton (*steel-concrete composite*). Sistem ini memanfaatkan kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik baja untuk mencapai efisiensi struktural yang lebih tinggi.

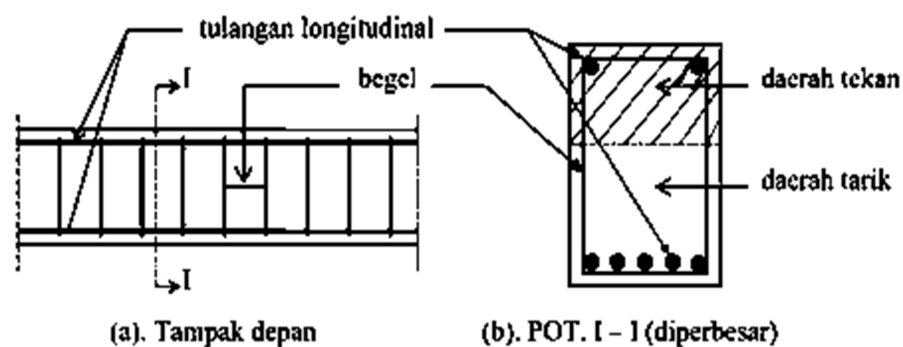
5. Balok Bertulangan Ganda (*Continuous Beam*)

Balok ini menopang dua atau lebih bentang dan memiliki momen positif di tengah serta momen negatif di tumpuan. Tulangan ditempatkan di bagian atas dan bawah untuk menahan pembalikan momen akibat beban berulang.

Jenis-jenis balok tersebut dipilih berdasarkan kebutuhan struktural, efisiensi material, dan pertimbangan pelaksanaan di lapangan. Dalam penelitian ini, fokus utama diarahkan pada balok beton bertulang biasa dengan variasi tulangan rangkap (A_s dan A_s') untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kapasitas lentur, defleksi, dan daktilitas.

2.2.3 Balok tulangan rangkap

Balok tulangan rangkap atau *doubly reinforced beam* adalah balok beton bertulang yang memiliki tulangan baja di zona tarik (A_s) dan juga di zona tekan (A_s'). Penambahan tulangan tekan dilakukan jika tinggi balok dibatasi oleh pertimbangan arsitektur atau fungsi ruang, atau ketika dibutuhkan peningkatan kapasitas lentur tanpa memperbesar dimensi penampang (Editorial, 2021). Balok tulangan rangkap dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1. Balok tulangan rangkap

Fungsi utama dari tulangan tekan adalah meningkatkan kapasitas momen lentur, memperbaiki kekakuan struktur, serta mengurangi defleksi. Tulangan tekan juga membantu mengendalikan retak pada zona tekan dan menambah daktilitas struktur. Selain itu, pada balok berkelanjutan (*continuous beam*), tulangan tekan berfungsi menahan gaya tarik yang timbul akibat pembalikan momen di daerah tumpuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan tulangan tekan sebesar 0,3–0,5% dari luas penampang efektif mampu meningkatkan kapasitas momen hingga 15% serta menghasilkan pola retak yang lebih merata dan terkendali (Editorial, 2021).

2.2.4 Sifat-sifat baja tulangan

Berangkat dari sifat mekaniknya, kuat tarik dan modulus elastisitas baja tulangan merupakan dua parameter kunci yang menentukan perilaku struktur beton bertulang di bawah beban. Dalam sistem ini, baja tulangan berfungsi sebagai elemen penahan tarik utama, sementara beton menahan gaya tekan. Keduanya bekerja sinergis berkat adanya adhesi (bond) yang baik antara permukaan baja dan pasta semen di sekitarnya.

Kuat tarik baja, yang umumnya diukur melalui dua parameter utama f_y (*yield strength*) dan f_u (*ultimate strength*) menunjukkan batas elastis dan kapasitas maksimum material sebelum patah. Nilai f_y berkisar antara 240 hingga 500 MPa untuk baja tulangan konvensional, dan dapat mencapai 550–690 MPa pada baja berkelas tinggi sesuai SNI 2052:2024 (Nasional, 2024). Nilai f_u sendiri menunjukkan kekuatan maksimum baja sebelum terjadi kerusakan plastis permanen, biasanya lebih tinggi 10–25% dibanding f_y . Karakteristik inilah yang memberikan baja sifat duktil, yaitu kemampuan mengalami deformasi besar tanpa kehilangan kekuatan secara tiba-tiba sebuah faktor vital dalam desain struktur tahan gempa (Setiawan, 2023).

Menurut penelitian oleh Pradana & Nugroho (2021) di *Jurnal Teknik Sipil UGM*, hubungan tegangan–regangan baja tulangan menunjukkan perilaku linier hingga mencapai f_y , lalu dilanjutkan fase plastis yang panjang sebelum patah. Pola ini memastikan bahwa elemen baja dapat memberikan peringatan dini melalui deformasi besar sebelum kolaps total, berbeda dengan beton yang cenderung getas. Dalam konteks ketahanan gempa, daerah plastis inilah yang menyerap energi dinamis sehingga struktur tetap berdiri meski mengalami kerusakan lokal.

Sementara itu, modulus elastisitas baja (E_s) menunjukkan kekakuan material terhadap deformasi elastis. Nilainya konstan dan tinggi, sekitar 200.000 MPa (200 GPa), sebagaimana ditegaskan dalam SNI 2847:2019. Nilai ini hampir sepuluh kali lipat dari modulus elastisitas beton (20.000–35.000 MPa), menjadikan baja jauh lebih efektif dalam menahan gaya tarik. Penelitian oleh Rahman et al. (2022) di *Jurnal Infrastruktur dan Konstruksi Indonesia*

menegaskan bahwa rasio modulus yang besar antara beton dan baja ini mendasari asumsi dasar perhitungan “*plane sections remain plane*”, yakni regangan linier pada penampang beton bertulang masih berlaku dalam batas elastis.

Sifat elastisitas tinggi baja juga memungkinkan redistribusi gaya dalam elemen struktur, karena baja mampu menyesuaikan regangan tanpa kehilangan kapasitasnya. Dalam pengujian yang dilakukan oleh Yusuf & Kuncoro (2020), baja BJTS 400 menunjukkan perilaku stabil hingga 0,25% regangan sebelum leleh, dan mampu mencapai 10 kali regangan elastis saat mendekati titik patah. Temuan ini memperkuat pernyataan bahwa baja tulangan tidak hanya berfungsi sebagai penguat tarik, tetapi juga sebagai elemen penyerap energi dalam sistem struktur beton bertulang.

2.2.5 Sifat-sifat bambu

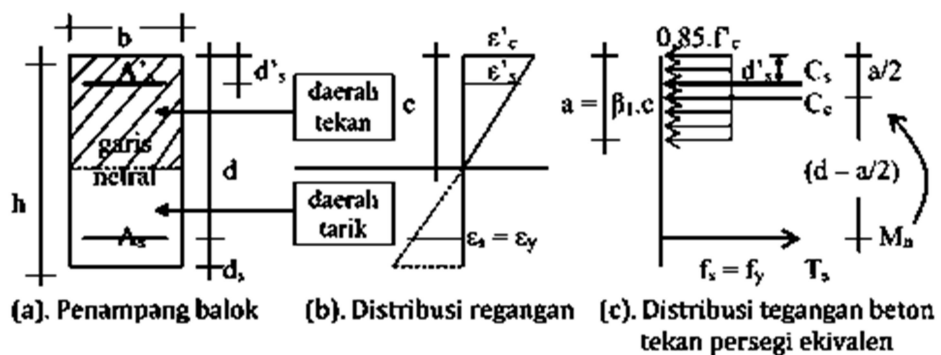
Menurut ISO 22157:2019 – *Bamboo structures: Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods*, sifat bambu ditentukan melalui karakteristik fisik dan mekanik yang dapat diukur secara ilmiah untuk memastikan kelayakan bambu sebagai bahan konstruksi. Secara teori, bambu memiliki sifat anisotropik (kekuatan berbeda menurut arah serat) dan berongga, sehingga standar ini menetapkan metode untuk mengukur parameter utama seperti kadar air (Pasal 7), densitas (Pasal 8), massa per satuan panjang (Pasal 9), serta sifat mekanik meliputi kekuatan tekan sejajar serat (Pasal 10), kekuatan tarik sejajar serat (Pasal 11), kekuatan lentur (Pasal 12), kekuatan geser (Pasal 13), dan kekuatan tarik tegak lurus serat (Pasal 14). Ketentuan ISO 22157:2019 menegaskan bahwa setiap pengujian harus dilakukan pada kondisi lingkungan terkontrol dan hasilnya dilaporkan dengan nilai modulus elastisitas serta kekuatan maksimum. Dengan demikian, sifat bambu menurut ISO 22157:2019 digambarkan sebagai kombinasi dari kemampuan fisik dan mekanik yang diverifikasi melalui prosedur pengujian standar agar dapat digunakan secara aman dan efisien dalam aplikasi struktural.

Karakteristik mekanik bambu telah banyak dikaji untuk menunjukkan kelayakannya sebagai material struktural maupun material alternatif pengganti baja. Studi eksperimental oleh Irawati et al., (2025) pada bambu Wulung

(*Gigantochloa atrovioleacea*) melaporkan bahwa perilaku tarik bambu sejajar serat cenderung linier hingga gagal, dengan tegangan tarik ultimit berada pada rentang 70,13–198,42 MPa. Hasilnya juga menegaskan pengaruh node terhadap penurunan kapasitas tarik, dimana rata-rata tegangan tarik ultimit pada internode lebih tinggi daripada node (misalnya rerata keseluruhan internode 164,77 MPa dan node 92,77 MPa). Pada sisi tekan, penelitian yang sama menunjukkan kuat tekan ultimit rata-rata sekitar 53,71 MPa (*internode*) dan 51,30 MPa (*node*) sedangkan modulus elastisitas tekan rata-rata sebesar 21.270 MPa (*internode*) dan 15.264 MPa (*node*), yang mengindikasikan internode memiliki kekakuan tekan lebih tinggi. Temuan-temuan tersebut penting karena memperlihatkan bahwa bambu memiliki kekuatan tarik yang relatif tinggi namun respons tekan yang berbeda (lebih plastis), serta adanya variasi sifat akibat *node–internode* yang perlu dipertimbangkan dalam pemodelan atau perhitungan kapasitas elemen.

2.2.6 Analisis penampang balok beton

Teori lentur balok beton bertulang berakar pada prinsip dasar mekanika bahan, yaitu bahwa penampang datar yang sebelum lentur akan tetap datar setelah lentur. Artinya, distribusi regangan pada penampang bersifat linier dari serat tekan hingga serat tarik. Dalam kondisi elastis, baik beton maupun baja tulangan masih berperilaku linier terhadap regangan. Namun, ketika beban meningkat hingga mendekati kapasitas ultimit, perilaku kedua material menjadi nonlinier, dan interaksi antara beton serta tulangan menjadi sangat menentukan kapasitas lentur akhir dari elemen tersebut. Distribusi tegangan-regangan pada balok tulangan rangkap dapat dilihat pada gambar 2.2 sebagai berikut.



Gambar 2.2. Distribusi tegangan-regangan pada balok tulangan rangkap

Dalam sistem desain modern, pendekatan yang digunakan adalah Ultimate Strength Design (USD) sebagaimana diatur dalam SNI 2847:2019, yang mengadopsi ketentuan dari ACI 318M-14. Metode ini mengasumsikan bahwa kapasitas momen ultimit dari penampang terjadi saat serat terluar beton di sisi tekan mencapai regangan maksimum sekitar 0,003, sementara baja tulangan tarik telah mencapai atau melebihi regangan leleh. Pada kondisi tersebut, keseimbangan gaya dalam penampang dicapai ketika gaya tekan beton ekuivalen sama dengan gaya tarik tulangan baja.

Kekuatan tekan beton diwakili oleh blok tekan persegi panjang ekuivalen dengan intensitas tegangan sebesar $0,85f'_c$, di mana f'_c merupakan kuat tekan beton silinder. Luas daerah tekan ekuivalen dinyatakan sebagai $b \times a$, dengan b adalah lebar penampang dan $a = \beta_1 c$, di mana c adalah jarak dari serat tekan terluar ke garis netral, sedangkan β_1 adalah faktor yang menyesuaikan bentuk kurva tegangan-regangan beton tergantung pada mutu beton. Untuk beton mutu normal ($f'_c \leq 30$ MPa), β_1 biasanya diambil 0,85, dan berkurang seiring peningkatan mutu beton. Keseimbangan gaya pada penampang dalam kondisi ultimit dapat dinyatakan secara matematis dalam persamaan 2.1 sebagai berikut.

$$0,85 f'_c b a = A_s f_y \quad (2.1)$$

di mana A_s adalah luas tulangan tarik dan f_y adalah tegangan leleh baja tulangan. Dengan demikian, kedalaman blok tekan ekuivalen dapat dihitung dengan persamaan 2.2 sebagai berikut.

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} \quad (2.2)$$

Setelah nilai a dari persamaan 2,2 sudah diketahui maka jarak ke garis netral dapat diperoleh dengan persamaan 2.3 sebagai berikut.

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (2.3)$$

Setelah diketahui nilai a , kapasitas momen nominal M_n dapat dihitung dengan persamaan 2.4 sebagai berikut.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.4)$$

dengan d merupakan jarak dari serat tekan ke sumbu tulangan tarik. Untuk nilai momen desain (M_U) diperoleh dengan menerapkan faktor reduksi kekuatan (ϕ), biasanya $\phi=0,90$ untuk kondisi *tension-controlled*, sehingga diperoleh persamaan momen desain pada persamaan 2.5 sebagai berikut.

$$M_U = \phi M_n \quad (2.5)$$

Prinsip dasar perhitungan ini menunjukkan bahwa kapasitas lentur suatu balok sangat dipengaruhi oleh distribusi regangan dan keseimbangan gaya antara beton dan baja tulangan. Dalam kondisi ultimit, beton bekerja penuh pada sisi tekan hingga batas regangan 0,003, sedangkan baja tulangan menahan gaya tarik hingga batas lelehnya. Hubungan tegangan-regangan beton pada kondisi tersebut tidak linier karena beton merupakan material getas yang tidak mampu menahan gaya tarik yang besar setelah retak, sedangkan baja tulangan bersifat ulet dengan kemampuan deformasi tinggi setelah mencapai leleh.

Pada beton tanpa konfinemen (*unconfined concrete*), hubungan tegangan–regangan bersifat nonlinier dengan kenaikan tajam pada tahap awal kemudian mencapai puncak pada regangan sekitar 0,002 hingga 0,003, lalu menurun drastis akibat hilangnya kohesi internal agregat. Sebaliknya, pada beton dengan konfinemen (*confined concrete*), misalnya dengan sengkang spiral atau pengikat rapat, perilaku material menunjukkan peningkatan daktilitas dan kemampuan regangan yang lebih tinggi setelah puncak tegangan tercapai. Model konstitutif seperti *Kent–Park* dan *Mander* banyak digunakan untuk menggambarkan pengaruh konfinemen terhadap peningkatan regangan ultimit beton.

Untuk baja tulangan, perilaku tegangan–regangan ideal dapat dianggap sebagai bilinear, dengan daerah elastis linier mengikuti hukum Hooke hingga mencapai regangan leleh $\varepsilon_y = f_y/E_s$. Setelah melewati titik leleh, baja tulangan

memasuki daerah plastis di mana tegangan hampir konstan sebesar f_y , kemudian terjadi *strain hardening* sebelum putus. Karakteristik ini menjadikan baja tulangan sangat efektif untuk menahan gaya tarik dan memberikan daktilitas pada sistem struktur. Baja tulangan yang memiliki kekuatan leleh tinggi umumnya menghasilkan penampang yang lebih ramping, namun perlu diperhatikan bahwa peningkatan f_y tidak selalu diikuti peningkatan daktilitas yang proporsional. Beberapa studi di Indonesia dalam lima tahun terakhir telah mengkaji kesesuaian model USD dengan hasil eksperimen laboratorium. Mulyono et al. (2022) melaporkan bahwa korelasi antara kapasitas lentur hasil pengujian dengan prediksi teoritis mencapai koefisien determinasi $R^2 = 0,82$, menandakan keandalan pendekatan USD untuk variasi mutu beton dan jumlah tulangan. L. S. N. Hutaajulu (2023) juga menegaskan bahwa penggunaan faktor reduksi kekuatan $\phi=0,90$ memberikan hasil konservatif untuk berbagai kondisi pembebanan, terutama untuk balok bertulangan ganda.

Pendekatan *Ultimate Strength Design* juga memperhatikan aspek daktilitas struktur. Menurut SNI 2847:2019, suatu penampang dikategorikan *tension-controlled* jika regangan baja tarik pada kondisi ultimit melebihi 0,005, sedangkan dikategorikan *compression-controlled* jika regangan baja tarik kurang dari 0,002. Klasifikasi ini penting karena menentukan nilai faktor reduksi kekuatan (ϕ). Penampang yang memiliki regangan tarik besar memberikan perilaku daktil dan memperingatkan sebelum kegagalan, sedangkan penampang yang *compression-controlled* cenderung getas dan tidak memberikan tanda keruntuhan.

2.2.7 Tulangan tekan dan tulangan tarik

Dalam kerangka mekanika penampang, tulangan tarik didefinisikan sebagai batang baja yang ditempatkan di zona serat tarik balok untuk memikul gaya tarik yang tidak dapat dipikul beton setelah retak tarik awal, sebaliknya tulangan tekan adalah batang baja yang ditempatkan di zona serat tekan balok untuk ikut memikul sebagian gaya tekan bersama beton ketika tuntutan kapasitas atau kontrol lendutan/retak menuntut penampang yang lebih kuat atau lebih daktil. Pada pendekatan desain kekuatan ultimit sesuai SNI 2847:2019, perilaku lentur

dianalisis pada kondisi ketika serat terluar beton di sisi tekan mencapai regangan ultimit sekitar 0,003 dan penampang dianggap memenuhi syarat kompatibilitas regangan (penampang datar tetap datar). Ketentuan ini sekaligus menjadi rujukan baku untuk memformulasikan kontribusi tulangan tarik dan tekan pada konfigurasi tulangan rangkap (*doubly reinforced*), termasuk kriteria regangan yang membedakan penampang *tension-controlled* dan *compression-controlled* (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Secara fungsional, tulangan tarik berperan utama mengembangkan kapasitas lentur setelah beton retak di zona tarik, mengontrol pembukaan retak dan mengembalikan kekakuan efektif pasca retak; hal ini menjelaskan mengapa variasi rasio tulangan longitudinal mempengaruhi kuat lentur dan kurva beban-lendutan secara nyata pada balok uji di berbagai studi nasional. Sementara itu, tulangan tekan memiliki tiga fungsi penting: pertama, menambah kapasitas momen saat zona tekan beton telah mencapai keterbatasan blok tekan, sehingga gaya tekan tambahan “dialihkan” ke baja tekan; kedua, menaikkan daktilitas dan kemampuan disipasi energi karena baja tekan ikut berdeformasi plastis sebelum hancur tekan beton mendominasi; ketiga, membantu kontrol lendutan jangka panjang (akibat rangkai dan susut) karena memberikan cadangan kekakuan di zona tekan. Kajian laboratorium dan/numerik pada publikasi nasional lima tahun terakhir menunjukkan bahwa penambahan tulangan tekan dengan pengaturan jarak selimut dan jangkaran yang memadai dapat meningkatkan kekakuan awal, menunda terjadinya *yield* di tulangan tarik, serta meningkatkan kapasitas ultimit dan daktilitas balok. Temuan tersebut konsisten pada uji kuat lentur dan evaluasi kurva beban-defleksi di berbagai skenario mutu beton/rasio tulangan (L. S. N. Hutaajulu, 2023).

Secara teoretis, pengaruh tulangan tekan terhadap kapasitas momen paling jelas pada penampang bertulangan rangkap. Ketika beton tekan telah dimodelkan dengan blok ekuivalen $0,85 f'_c b a$ dan tulangan tarik utama A_s mencapai leleh, tambahan pasangan gaya dari tulangan tekan A'_s dan bagian tulangan tarik “pasangannya” akan membentuk kopel momen tambahan di atas momen yang disumbang beton+ A_s . Dengan mengasumsikan tulangan tekan juga mencapai

leleh ($f'_s \approx f_y$) pada jarak efektif d' dari serat tekan, formulasi konseptual yang lazim dipakai adalah pemisahan kapasitas menjadi dua komponen: $M_n = M_{c+A_s} + M_{(A'_s+A_{s2})}$ dimana $M_{c+A_s} = 0,85 f'_c b a \left(d - \frac{a}{2}\right)$ merepresentasikan kontribusi beton tekan dan tulangan tarik hingga setara blok tekan, sedangkan $M_{(A'_s+A_{s2})} \approx A'_s f_y (d - d')$ mewakili kopel dari tulangan tekan terhadap tulangan tarik tambahan yang “menyeimbangkan” gaya tekan baja tersebut. Pada kondisi di mana tulangan tekan belum mencapai leleh, tegangan efektifnya dihitung elastis $f'_s = E_s \varepsilon'_s$ dari kompatibilitas regangan, sehingga kopel yang terbentuk menjadi lebih kecil. Formulasi ini yang esensinya juga diturunkan di referensi pendidikan tinggi dalam negeri menjelaskan mengapa peningkatan A'_s (dengan penempatan efektif) menaikkan M_n dan dapat menggeser penampang menuju perilaku lebih daktil, selama pengendalian rasio tulangan total tidak mengarah pada kondisi *over-reinforced* yang membuat keruntuhan didominasi hancur tekan beton (Standardization, 2019a)

Dari sudut pandang empiris nasional, beberapa publikasi mengonfirmasi peningkatan kapasitas akibat strategi penulangan longitudinal. Studi perilaku penampang dengan variasi rasio tulangan longitudinal melaporkan kenaikan kapasitas lentur seiring bertambahnya rasio tulangan (pada mutu beton konstan), sejalan dengan teori bahwa peningkatan kontribusi baja tarik dan baja tekan menaikkan momen tahan dan mengubah kurva momen-kelengkungan menjadi lebih “penuh” sebelum *crushing*. Penelitian lain berbasis pemodelan dan uji di Indonesia menunjukkan bahwa penambahan tulangan tekan memperbaiki kekakuan dan daktilitas global, memperlambat degradasi kekuatan pasca puncak, serta memperbaiki pola retak, dengan catatan bahwa detailing jangkar, selimut, dan spasi sengkang di sekitar zona tekan harus memadai agar tulangan tekan benar-benar berpartisipasi. Temuan-temuan ini konsisten dengan kerangka SNI dan mendukung penggunaan tulangan rangkap pada kondisi momen besar, bentang panjang, atau tuntutan kontrol lendutan/retak layanan yang ketat (MedKons UHO, 2022).

Sebagai catatan material alternatif, sejumlah riset Indonesia mulai meninjau bambu sebagai pengganti atau pelengkap baja tulangan dengan motivasi keberlanjutan. Namun secara regulatif, SNI 2847:2019 belum memasukkan bambu sebagai tulangan struktural pada beton bertulang; oleh karenanya, penelitian terkait harus merujuk pada standar ISO untuk karakterisasi dan perancangan struktur bambu. ISO 22157:2019 menetapkan metode uji sifat fisik-mekanis bamboo antara lain kadar air, densitas, kuat tarik/tekan/lentur sejajar serat, serta modulus elastisitas yang diperlukan untuk menetapkan nilai karakteristik; sedangkan ISO 22156:2021 memberikan panduan desain struktur berbahan bambu culm bulat, termasuk batasan penerapan dan prinsip perincian (detailing). Dalam konteks balok beton, data karakteristik dari ISO 22157 diperlukan bila meneliti bambu sebagai batang tarik/tekan, sementara prinsip desain ISO 22156 menjadi acuan ketika bambu digunakan sebagai elemen struktural utama. Karena perbedaan sifat reologi dan higroskopisitas dibanding baja, isu adhesi bambu-beton, durabilitas, dan perlindungan terhadap kelembapan wajib diuji sebelum menarik kesimpulan desain, sehingga saat ini penerapan bambu pada penampang balok bertulang tetap berada pada ranah eksperimental/rekayasa khusus (Standardization, 2019b).

Secara keseluruhan, definisi operasional dan fungsi tulangan tarik serta tulangan tekan berpangkal pada pembagian kerja yang sesuai dengan sifat material: baja memikul tarik dan turut memikul tekan bila diperlukan, sedangkan beton memikul tekan utama. Pada konfigurasi tulangan rangkap, tulangan tekan terbukti meningkatkan kapasitas momen dan daktilitas melalui terbentuknya kopel tambahan, dengan formulasi teoritis yang kompatibel dengan SNI 2847:2019 dan didukung bukti eksperimen/pemodelan dalam literatur nasional mutakhir. Implementasi praktisnya mensyaratkan kontrol rasio tulangan agar tidak *over-reinforced*, detailing yang baik, serta evaluasi kinerja layanan sementara eksplorasi bambu sebagai alternatif membutuhkan kepatuhan pada ISO 22157 dan ISO 22156 sampai ada adopsi eksplisit di SNI (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

2.2.8 Kapasitas nominal momen penampang balok

Kapasitas nominal momen penampang balok merupakan besaran maksimum momen lentur yang dapat ditahan oleh suatu penampang beton bertulang sebelum terjadi keruntuhan pada kondisi ultimit. Dalam terminologi SNI 2847:2019, kapasitas nominal momen (M_n) didefinisikan sebagai kemampuan teoritis penampang untuk menahan momen akibat kombinasi gaya tekan beton dan gaya tarik baja tulangan pada kondisi seimbang (*ultimate limit state*) sebelum beton di serat tekan luar mencapai regangan ultimit sekitar 0,003. Nilai ini belum memperhitungkan faktor reduksi kekuatan (ϕ) yang digunakan dalam desain untuk menjamin tingkat keandalan struktur.

Secara fisik, M_n mencerminkan hasil kali antara gaya tarik baja dan lengan momen antara gaya tekan beton ekuivalen terhadap gaya tarik baja. Kapasitas nominal momen menjadi parameter utama dalam perencanaan balok karena menentukan apakah penampang mampu memikul beban rencana tanpa melampaui batas keruntuhan lentur. Bila kapasitas momen aktual dari beban yang bekerja (M_u) lebih kecil dari momen nominal yang direduksi (ϕM_n), maka penampang dianggap aman terhadap keruntuhan lentur (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Dengan demikian, konsep ini menjadi inti dari desain berbasis kekuatan (*strength design method*) yang kini diterapkan secara universal dalam standar beton modern, termasuk dalam konteks desain berbasis kinerja (*performance-based design*) yang mulai diterapkan di Indonesia.

Berdasarkan SNI 2847:2019 kapasitas nominal momen (M_n) balok rangkap dihitung dengan menjumlahkan kontribusi momen dari A_s dan A'_s . Persamaan dasarnya mengacu pada keseimbangan gaya dalam kondisi batas. Momen nominal penampang pada balok tulangan rangkap dapat dihitung dengan persamaan 2.6 sebagai berikut

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d') \quad (2.6)$$

Dimana:

M_n = Kapasitas nominal momen

A_s = luas tulangan tarik

A'_s	= luas tulangan tekan
f_s	= tegangan tarik baja tulangan
f'_s	= tegangan tekan baja tulangan
d	= jarak efektif tulangan tarik
d'	= jarak efektif tulangan tekan
a	= kedalaman blok tekan ekuivalen.

2.2.9 Kontribusi tulangan tekan

Dalam sistem beton bertulang, tulangan tekan memiliki peran struktural yang penting, meskipun pada tahap awal perancangan sering dianggap sebagai elemen sekunder dibanding tulangan tarik. Secara konseptual, tulangan tekan adalah batang baja yang ditempatkan di zona serat tekan balok dengan tujuan untuk ikut memikul sebagian gaya tekan beton pada kondisi ultimit. Prinsip ini didasarkan pada kenyataan bahwa beton, meskipun memiliki kuat tekan tinggi, bersifat getas dan mengalami keruntuhan tiba-tiba bila beban melampaui batas regangan ultimit $\varepsilon_{cu} = 0003$. Dengan adanya tulangan tekan, sebagian gaya tekan dapat dialihkan ke baja, yang memiliki kemampuan deformasi plastis jauh lebih tinggi dibanding beton. Hal ini memungkinkan struktur untuk berperilaku lebih daktil dan memberikan tanda peringatan sebelum keruntuhan terjadi (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Analisis kontribusi tulangan tekan terhadap kapasitas nominal momen penampang dilakukan dengan menambahkan komponen gaya tekan tambahan yang dihasilkan oleh tulangan tekan A'_s pada keseimbangan gaya vertikal penampang. Dalam kondisi seimbang, total gaya tekan terdiri atas gaya tekan beton ekuivalen $C_c = 0,85 f'_c b a$ dan gaya tekan tulangan $C_s = A'_s f'_s$, sementara gaya tarik total diberikan oleh $T_s = A_s f_s$.

Secara teoritis, mekanisme peningkatan kapasitas momen oleh tulangan tekan dapat dijelaskan melalui pergeseran garis netral c ke bawah, akibat meningkatnya gaya tekan total di sisi atas penampang. Pergeseran ini menyebabkan lengan momen antara gaya tekan dan tarik ($d - a / 2$) menjadi lebih besar, sehingga menghasilkan momen tahan yang lebih tinggi. Selain itu, tulangan

tekan yang berdeformasi plastis pada saat beton tekan mulai retak mikro dapat berfungsi sebagai “penyerap energi” tambahan, yang menghambat penyebaran retak dan memperlambat kehilangan kekakuan (*stiffness degradation*). (Mulyono et al., 2022) menunjukkan bahwa pada model numerik balok bertulangan rangkap, kenaikan rasio tulangan tekan dari 0,5 % menjadi 1,5 % menghasilkan peningkatan M_n sekitar 6 % dan meningkatkan kemampuan pasca-leleh (*post-yield stiffness*) sebesar 9 %. Penelitian (MedKons UHO, 2022) juga menemukan korelasi linier antara peningkatan luas tulangan tekan dan kapasitas lentur, selama rasio total tulangan tidak melebihi batas balanced reinforcement ratio sesuai Pasal 22. SNI 2847:2019. Kontribusi tulangan tekan terhadap kapasitas nominal momen penampang balok dapat dihitung dengan persamaan 2.7.

$$\text{Kontribusi tulangan tekan} = A's f's(d - d') \quad (2.7)$$

Sementara itu persentase kontribusi tulangan tekan terhadap kapasitas nominal momen dapat dihitung dengan persamaan 2.8.

$$\% \text{ tekan} = \frac{A's f's(d - d')}{M_n} \times 100 \quad (2.8)$$

Dari sisi perilaku global, tulangan tekan memberikan pengaruh yang nyata terhadap daktilitas, kekakuan, dan pola retak pada balok beton bertulang. Balok dengan tulangan tekan menunjukkan kurva momen-kelengkungan yang lebih landai pada tahap pasca-elastis, menandakan peningkatan kemampuan deformasi plastis. Hal ini sesuai dengan temuan Okky (2015) yang menyatakan bahwa keberadaan tulangan tekan dapat menunda terbentuknya retak lebar di zona tekan dan memperbaiki distribusi tegangan pada serat-serat beton. Selain itu, keberadaan tulangan tekan menurunkan kemungkinan terjadinya compression crushing prematur karena sebagian tegangan pada beton dialihkan ke baja tekan, sehingga keruntuhan menjadi lebih bertahap dan memberikan peringatan dini (warning failure mode). Penelitian J. Hutaajulu (2023) menambahkan bahwa balok dengan

konfigurasi tulangan rangkap menunjukkan pola retak yang lebih halus dan distribusi lendutan yang lebih seragam dibanding balok bertulangan tunggal.

Dalam konteks material alternatif, beberapa penelitian di Indonesia mulai mengevaluasi potensi bambu sebagai elemen yang dapat berfungsi mirip tulangan tekan. Berdasarkan ISO 22157:2019 dan ISO 22156:2021, bambu memiliki sifat tekan yang baik sejajar serat (kuat tekan 40–80 MPa) dan kekuatan tarik tinggi (hingga 250 MPa). Namun, karena modulus elastisitas bambu jauh lebih rendah daripada baja (sekitar 10–20 GPa), kontribusi tekan bambu terhadap momen nominal tidak sebesar baja. Menurut Sari & Kusuma (2021) melaporkan bahwa “balok beton bertulangan bambu menunjukkan perilaku lentur yang lebih getas dibanding baja, dengan kapasitas nominal momen hanya mencapai 60 % dari balok konvensional” (p. 63). Oleh sebab itu, dalam penerapan eksperimental, bambu lebih berperan meningkatkan keberlanjutan material dan kontrol retak awal, bukan menggantikan secara penuh peran tulangan tekan baja dalam menambah kapasitas ultimit.

Secara keseluruhan, kontribusi tulangan tekan terhadap kapasitas nominal momen penampang balok terbukti melalui peningkatan gaya tekan total dan perluasan fase plastis yang dihasilkan. Dalam perhitungan teoretis, penambahan tulangan tekan meningkatkan M_n melalui komponen $A's f's(d - d')$, sementara secara empiris berpengaruh terhadap peningkatan daktilitas, kekakuan pasca-leleh, dan distribusi retak. Keberadaan tulangan tekan menjadikan balok lebih tahan terhadap beban berulang, lendutan besar, serta kondisi pembebanan dinamis. Dengan demikian, penggunaan tulangan tekan yang proporsional dan sesuai rekomendasi SNI 2847:2019 dapat meningkatkan kinerja struktur tidak hanya dari sisi kekuatan, tetapi juga dari aspek keamanan dan ketahanan jangka panjang.