

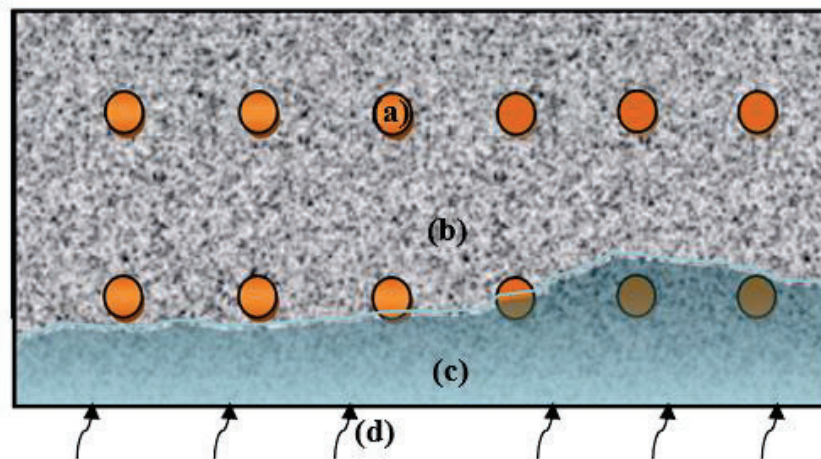
BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton adalah bahan bangunan yang paling banyak digunakan di dunia karena kuat dan tahan lama, sehingga sering digunakan untuk membangun bangunan tinggi, jembatan, dan infrastruktur lainnya. Dengan kemajuan dalam teknologi konstruksi dan perkembangan pembangunan yang pesat saat ini, beton bertulang telah menjadi salah satu pilihan bahan konstruksi yang paling umum digunakan dalam elemen struktur. Hal ini disebabkan oleh berbagai manfaat beton bertulang, termasuk kemudahan penggunaannya, kekuatan tekan yang tinggi, biaya produksi, dan perawatan yang rendah.

Namun, berbagai hal dapat menyebabkan beton rusak, seperti korosi, abrasi, dan benturan. Struktur beton yang melewati usia rencananya akan kehilangan kekuatan atau bahkan rusak. Perubahan fungsi atau beban pelaksanaan yang tidak sesuai dengan rencana awal dan faktor lingkungan juga dapat menyebabkan kerusakan struktur.

Faktor lingkungan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur beton. Serangan asap atau udara menghasilkan karbon dioksida yang direaksi dengan paparan air, yang menghasilkan asam karbonat. Korosi besi atau tulangan yang mengembang menyebabkan selimut beton terkelupas atau spalling, karena desakan korosi pada besi atau tulangan yang mengembang, seperti diperlihatkan pada **Gambar 1.1.** dan **Gambar 1.2.**



Gambar 1.1. Serangan air dan asap atau udara: (a) besi tulangan (b) beton (c) resapan air atau H₂O (d) karbon dioksida atau Ca(OH)₂ + CO₂



Gambar 1.2. *Spalling* pada beton bertulang akibat korosi

Grouting merupakan salah satu cara untuk memperbaiki beton yang rusak. Ini adalah proses memasukkan bahan pengisi ke dalam retakan atau celah beton. Bahan pengisi dapat berupa beton, epoxy, atau resin.

Pada penelitian terdahulu tentang perbaikan dengan metode *grouting* yang dilakukan Said, Djamaluddin, & Irmawaty (2023) memberikan hasil yang baik, tetapi pada beberapa studi kasus didapati bahwa perbaikan dengan metode *grouting* memiliki kekurangan yang sama, dimana menunjukkan adanya *debonding*.

Untuk perbaikan yang berhasil, ikatan antara beton *grouting* dan beton lama harus kuat. Ikatan yang lemah dapat menyebabkan beton lama lepas dari beton *grouting*. *Debonding* dapat membahayakan keselamatan bangunan, karena mengurangi kapasitas lentur balok perbaikan.

Beberapa perlakuan *Antarmuka* pada perbaikan beton dengan *grouting* telah dilakukan seperti penggunaan *bonding agent*, *sandblasting*, pembersihan, dan pembasahan. Perlakuan-perlakuan yang dilakukan terkadang menjadi tidak maksimal dan kurang efektif, karena dilakukan bersamaan pada pengaplikasian konvensional tanpa melihat pengaruh pada tiap perlakuan. Oleh karena itu, penelitian harus dilakukan untuk mengetahui bagaimana perawatan *Antarmuka* beton *grouting* dan beton lama memengaruhi kapasitas lentur balok perbaikan.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, dilakukan penelitian lanjut mengenai perlakuan *Antarmuka* yang diharapkan dapat membantu dalam mengembangkan metode perbaikan *grouting* dengan melihat pengaruh dari tiap perlakuan *Antarmuka* antara beton lama dan beton *grouting*, yang dianalisis pada tesis berjudul **“PENGARUH PERLAKUAN ANTARMUKA BETON EKSISTING DAN GROUTING BETON BERDASARKAN KAPASITAS BENDING BALOK PERBAIKAN”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas maka dapat dirumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh perlakuan *antarmuka* beton lama dan beton *grouting* terhadap kapasitas lentur balok perbaikan?
2. Bagaimana efektivitas perlakuan *antarmuka* terhadap ikatan *antarmuka* beton lama dan beton *grouting*?

1.3 Tujuan Penelitian

Rumusan masalah di atas menunjukkan bahwa tujuan penelitian diperlukan untuk menjawab rumusan masalah yang terjadi. Sebagai contoh, tujuan penelitian dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh perlakuan antarmuka beton lama dan beton *grouting* dalam meningkatkan kapasitas lentur balok perbaikan.
2. Mengevaluasi efektivitas perlakuan antarmuka yang paling efektif dalam meningkatkan ikatan antarmuka beton lama dan beton *grouting*.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menawarkan beberapa manfaat seperti:

1. Studi ini dapat memberikan informasi baru tentang bagaimana perawatan *Antarmuka* beton *grouting* dan beton lama memengaruhi kapasitas lentur balok perbaikan.
2. penelitian ini dapat menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut tentang bagaimana perlakuan *Antarmuka* beton *grouting* dan beton lama, berdampak pada kapasitas tarik, kapasitas geser, dan ketahanan korosi.
3. Penelitian ini dapat digunakan untuk menentukan perlakuan *Antarmuka* terbaik untuk meningkatkan kapasitas lentur balok perbaikan.
4. meningkatkan efektivitas metode *grouting* dalam memperbaiki beton yang rusak.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut untuk mencapai tujuan penelitian dan menghindari diskusi di luar konsep penelitian.

1. Balok beton bertulang dengan ukuran balok 15 cm x 20 cm x 330 cm, dengan jarak 300 cm antara tumpuan dan tumpuan.
2. Menyiapkan dua belas benda uji balok beton bertulang, yang terdiri dari:
 - a. Tiga buah balok beton bertulang normal dengan tulangan tarik 3D13 & tulangan tekan 2D10 sebagai balok kontrol
 - b. Sembilan buah balok beton bertulang yang diperbaiki dengan metode *grouting* sepanjang ± 270 cm dan kedalaman ± 5 cm, dimana daerah *grouting* ini berada pada sisi tarik beton.
3. Beton yang digunakan berasal dari penyedia beton (ready mix) dengan mutu $f'_c = 25$ MPa
4. Bahan untuk *grouting* menggunakan "SikaGrout®-215 (new)"
5. Dilakukan perlakuan yang sama pada 9 balok variasi yaitu pembersihan menggunakan *vacuum cleaner* dan penyisiran pada daerah *grouting* dengan sikat besi
6. Pengadukan material *grouting* menggunakan mixer yang diharapkan tercampur dengan baik
7. Pada perlakuan *sandblasting* menggunakan alat Airman PDS-185S-6C2 dan Wipro *Sand Blasting Tank* (38L) SB-38-(26-3160-038) serta bahan pasir kuarsa

8. Menyiapkan perlakuan yang berbeda pada variasi balok yang dibagi menjadi, *sand blasting*, *bonding agent*, pembasahan menggunakan cairan yang terbuat dari material *grouting* dan air.

1.6 Hasil Penelitian Terdahulu

Tesis ini disusun berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya. Beberapa penelitian terdahulu sebagai berikut:

Penelitian yang dilakukan Moccia, Ruiz, & Muttoni, (2021) memberikan pemahaman *spalling* pada beton dipengaruhi oleh tulangan, Reaksi *spalling* bervariasi antar elemen yang dicetak pada lapisan atas dan bawah akibat terjadinya pendarahan dan pengendapan plastis pada beton segar. Pengendapan plastis menyebabkan terbentuknya retakan yang memanjang dari batang atas hingga ke permukaan. Retakan ini dapat meluas ketika terkena tekanan internal dan pada akhirnya berkontribusi pada proses pengelupasan. Sebaliknya, batangan yang terletak di dekat permukaan bawah tidak mempunyai celah seperti itu. Pendarahan juga dikaitkan dengan penurunan kekuatan tarik beton di dekat permukaan tempat beton dituangkan, yang mengakibatkan berkurangnya ketahanan terhadap pengelupasan pada batangan yang terletak lebih dekat ke permukaan bawah. peningkatan kerentanan terhadap kerapuhan pada elemen lapisan bawah ketika terkena tekanan internal di dalam bukaan. Dalam skenario ini, keruntuhan timbul dari pembentukan dan penyebaran retakan secara tiba-tiba (hanya retakan yang hampir vertikal yang dapat berkembang secara stabil). Sebaliknya, adanya retakan yang sudah ada sebelumnya yang disebabkan oleh pengendapan plastis memungkinkan penyebaran retakan tersebut secara terkendali di lapisan atas hingga akhirnya retak. Hal ini terkait dengan respons yang tidak terlalu rapuh.

Qiao, Nakamura, Tran, Yamamoto, & Miura, (2015) Hasil analisa menunjukkan bahwa korosi lokal lebih besar panjangnya berpotensi menyebabkan luas *spalling* yang lebih besar pada pelat penutup beton. Fitur ini harus diperhatikan untuk pemeliharaan struktur beton bertulang yang terkorosi. Distribusi korosi yang bervariasi pada arah panjang tulangan dapat menyebabkan perilaku retak tiga dimensi, yaitu perambatan retakan internal akan berubah sepanjang panjang tulangan. Selain itu, korosi yang terkonsentrasi pada bagian lokal tampaknya menyebabkan retakan lateral condong ke permukaan beton dan bukannya merambat secara horizontal seperti yang ditunjukkan pada kasus korosi seragam memanjang. Retakan miring miring dan retak vertikal cenderung membentuk bidang rekahan dan mengakibatkan lapisan penutup terkelupas.

Said, Djamaluddin, & Irmawaty, (2023) melakukan penelitian pada perbaikan beton bertulang yang mengalami kondisi *spalling*, adapun benda uji yang dibuat berdimensi 150 mm × 200 mm × 3300 mm, dengan mutu beton 20 MPa. Benda uji dibuat dalam dua versi. yang pertama adalah balok beton bertulang tanpa *grouting* yang berfungsi sebagai balok kontrol dan diberi simbol BK sebanyak tiga buah. Versi kedua adalah balok beton bertulang dengan sika grout di daerah tarik balok dan diberi simbol BGR sebanyak tiga buah. Pada penelitian ini melakukan dua perlakuan pada *Antarmuka* beton lama yaitu, pembersihan menggunakan *vacuum cleaner*, dan

melakukan pengolesan *bonding agent* sebelum melakukan *grouting*. Hasil penelitian menyatakan uji balok BK mengalami kegagalan lentur secara keseluruhan, sedangkan pada uji balok variasi menunjukkan kegagalan delaminasi antara beton lama dan mortar *grouting*. Pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa menggunakan *grouting* pada balok yang rusak belum mampu meningkatkan kapasitas kekuatan beton tetapi hanya berfungsi sebagai perbaikan untuk menutupi beton yang mengalami *spalling* agar bentuk nya seperti semula, ini didukung dengan beban maksimum balok BGR turun 47.62% dibandingkan dengan balok BK.

Fandi (2023) meneliti mengenai pengujian pada empat buah balok yang terdiri dari balok normal, balok eksisting, balok dengan perbaikan & perkuatan *grouting* dan *GFRP sheet*, serta balok seperti variasi ketiga yang ditambahkan perkuatan *dynabolt* yang diharapkan meningkatkan ikatan antara beton lama dan mortar *grouting*. Penelitian ini juga mempersiapkan benda uji yang memiliki dimensi yang sama dengan penelitian Said, Djameluddin, & Irmawaty, (2023), begitu juga daerah *grouting* yang dipersiapkan. Hasil analisis yang di dapatkan oleh Fandi menunjukkan perbaikan & perkuatan menggunakan *GFRP sheets* dan *grouting* meningkatkan kapasitas lentur sebesar 30.26% terhadap balok normal dan 69.08% terhadap balok eksisting, sedang perbaikan & perkuatan menggunakan *GFRP sheets*, *grouting*, dan penambahan *dynabolt* meningkatkan kapasitas lentur sebesar 9.53% dibanding balok normal dan 48.38% disbanding balok eksisting. Tetapi pada penelitian ini menunjukkan masih terjadinya delaminasi pada kedua variasi, hal ini juga diawali dengan retak dimana terjadi pada kedua balok variasi yang mengalami retak, dimulai pada mortar *grouting* dan tidak menerus secara baik pada beton lama, juga hal ini menyatakan belum terjadinya distribusi beban yang baik antara mortar *grouting* dan beton lama, serta menyiratkan ikatan antar beton lama dan mortar *grouting* belum maksimal, sehingga menjadi awal delaminasi pada variasi BGF dan berpotensi besar keruntuhan. Pada variasi BGF-D juga mengalami hal yang sama, hanya saja potensi keruntuhan masih terlihat aman karena adanya pengaruh *interlocking* yang disebabkan perkuatan *dynabolt*.

Igor, et al., (2018) mengemukakan Interaksi antara dua material, seperti beton dan baja prefabrikasi, sangat penting dalam aplikasi seperti perbaikan, pengisian, dan perkuatan. Penelitian telah menunjukkan bahwa nat non-susut yang digunakan pada tulangan beton dapat menyebabkan deformasi yang signifikan, sehingga berdampak negatif pada integritas struktur. Faktor-faktor yang mempengaruhi interaksi antara beton dan baja prefabrikasi antara lain tekanan udara pada substrat beton. Metode "*Pull-off*" dapat meningkatkan kekuatan beton ketika substratnya melemah. Analisis mikrostruktur substruktur beton dapat membantu menjelaskan dampak interaksi. Juga Penggunaan retarder dalam meletakkan dasar beton di atas substrat beton terbukti meningkatkan kekuatan beton, dengan beberapa penelitian menunjukkan peningkatan kekuatan hingga 107% dibandingkan dengan metode kontrol. Efek retarder terhadap kekuatan beton bergantung pada kombinasi dua jenis agregat: *Grout Aggregate* (GA) dan *Grout Paste* (G-P). Kekuatan aktif agregat berkontribusi terhadap kekuatan beton, meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi volume beton yang dihasilkan.

Tata, Raffel, Ihsan & Djamaluddin, (2018) melakukan uji eksperimen memanfaatkan GFRP pada balok dengan cara direndam dalam air laut untuk meningkatkan kapasitas uji lentur dan mengurangi kapasitas lembaran GFRP yang dipengaruhi oleh perendaman air laut. Kegagalan yang terjadi pada balok uji lentur diawali dengan kegagalan pada pusat beban (pertengahan bentang) dan terjadi *debonding* serta *spalling*.

Shaw & Andrawes, (2017) melakukan penelitian tentang kerusakan lapisan penutup beton pada balok beton prategang skala kecil. Balok-balok ini diuji di tiga lokasi lentur untuk menilai dampak kerusakan terhadap kapasitas geser balok. Beton penutup yang rusak diganti menggunakan perbaikan mortar cepat untuk menilai kapasitasnya dalam memulihkan kekuatan geser balok. Temuan menunjukkan bahwa perbaikan mortar saja tidak cukup untuk memulihkan kekuatan dan kekakuan awal balok. Kekuatan balok dipulihkan dengan menggunakan kaca yang diikat secara eksternal dan laminasi karbon FRP sebagai penguat geser, selain perbaikan mortar. Laminasi CFRP mengungguli laminasi GFRP dalam hal memulihkan dan melampaui kekakuan dan kekuatan balok yang tidak rusak untuk aplikasi spesifik ini.

Wang, et al., (2014) Melakukan studi eksperimental pada lima balok dalam kondisi *grouting* dan delapan balok mengalami korosi dipercepat sebelum melakukan uji lentur. Temuan menunjukkan bahwa perilaku retak pada balok dipengaruhi oleh kualitas ikatan antara kabel tendon dan *grouting* yang tidak memadai.

Luckai, (2011) menguraikan bagaimana risiko terbesar terhadap keutuhan struktur beton bertulang adalah pengelupasan yang disebabkan oleh karatnya baja tulangan, yang akan berdampak pada kekuatan lentur dan geser material. Pada penelitian yang dilakukan juga mengemukakan kesimetrisan *spalling* sepanjang balok atau di sekitar titik pembebanan kemungkinan besar tidak mempengaruhi kekuatan jika panjang pengembangannya terganggu.

Sand blasting adalah langkah penting dalam proses fabrikasi. Metode ini melibatkan pengerjaan logam dengan cara membenturkan bahan abrasif ke permukaan logam yang didorong pada tekanan tertentu, sehingga menghasilkan permukaan yang kasar dan rata dengan tingkat kekasaran dan laju erosi yang terkendali. Prosedur ini dilakukan dengan tujuan untuk menimbulkan tekstur kasar pada permukaan logam, sehingga memudahkan daya rekat yang kuat pada cat atau bahan pelapis lainnya, meminimalkan kemungkinan mudah terkelupas, dan mencegah korosi (Risqullah & Kadirman, 2022).

Sand blasting menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan substrat dibandingkan dengan permukaan tanah. Tingkat adhesi tergantung langsung pada kekasaran permukaan substrat. Ketika yang terakhir meningkatkan jumlah situs aktif dan akibatnya permukaan efektif ikatan juga meningkat. Harus ditekankan bahwa kekuatan adhesi tidak hanya bergantung pada sistem logam/pelapisan tetapi juga pada karakteristik perlakuan permukaan (Hammouda & Belmokre, 2019).

Studi eksperimental Dinis, Pedro, & Costa, (2012) beton segar dicor pada substrat yang mengeras, peningkatan kekasaran permukaan mempunyai kontribusi yang signifikan terhadap pencapaian kekuatan rekat. Selain itu, penggunaan bahan pengikat juga menguntungkan dan menghasilkan nilai kekuatan ikatan yang lebih

tinggi. Namun demikian, pada permukaan yang sangat kasar, seperti permukaan yang diperoleh dengan cara *shot-blasting*, pengaruh bahan pengikat kurang terasa. Jika substrat jenuh atau memiliki kadar air yang tinggi, meskipun permukaannya kering, pengaruh persiapan permukaan menjadi kurang signifikan. Dalam kondisi ini, penggunaan bahan pengikat menguntungkan namun juga kurang signifikan dibandingkan dengan kondisi yang sama namun dengan substrat kering. Kekasaran permukaan, penggunaan bahan pengikat dan kadar air substrat dapat mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan ikatan antarmuka dan mode kegagalan komponen beton komposit dengan lapisan yang dicetak pada umur yang berbeda. Jika dua lapisan beton yang sudah mengeras direkatkan menggunakan bahan pengikat, pengaruh persiapan permukaan tidak signifikan. Kekuatan ikatan yang dicapai dikendalikan, dan terutama dipengaruhi oleh bahan pengikat. Karena permukaan *shot-blasted* lebih tidak beraturan dibandingkan permukaan *as-cast* kiri dan permukaan *wire-brushed*, volume bahan pengikat yang ditempatkan pada antarmuka tampaknya tidak cukup untuk merekatkan kedua bagian beton dengan baik. Studi penelitian di masa depan diperlukan untuk menguatkan kemungkinan ini. Dengan meningkatkan kekasaran permukaan, dimungkinkan untuk memperoleh jumlah kegagalan non-perekat yang lebih tinggi, yaitu mode kohesif dan campuran. Penggunaan bahan pengikat juga menunjukkan bahwa kegagalan perekat dapat dicegah.

1.7 Beton Bertulang

1.7.1 Tinjauan Umum

Beton bertulang terdiri dari dua bagian utama, beton dan baja tulangan. Beton adalah material komposit yang terdiri dari agregat, semen, dan air, dan agregat digunakan untuk mengisi ruang kosong di dalamnya, dan semen diikat dengan air. Baja tulangan, yang dapat berupa batang, kawat, atau anyaman baja, digunakan untuk meningkatkan kekuatan tarik beton. Kekuatan beton bertulang dapat dihitung dengan menggunakan metode tegangan-regangan, elastisitas, dan plastisitas. Kekuatan beton bertulang ditentukan oleh kekuatan beton dan baja tulangan, serta interaksi antara keduanya (Diphoosodo, 1999).

SNI-03-2847 Pasal 3.13 (2019) menyatakan bahwa beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja sama untuk menahan gaya yang bekerja (Badan Standardisasi Nasional, 2019).

Tabel 1.1. Sifat mekanis baja tulangan beton

Kelas baja tulangan	Uji tarik			Uji lengkung		Rasio TS/YS (Hasil uji)
	Kuat luluh/leleh (Y/S)	Kuat Tarik (TS)	Renggang dalam 200 mm, Min.	Sudut lengkung	Diameter pelengkung	
	MPa	MPs	%		mm	
BjTS 280	Min 280 Maks 405	Min 350	11 ($d \leq 10$ mm)	180°	3.5 d ($d \leq 16$ mm)	Min 1.25
			12 ($d \leq 12$ mm)	180°	5 d ($d \geq 19$ mm)	
BjTS 420A	Min 420 Maks 545	Min 525	9 ($d \leq 10$ mm)	180°	3.5 d ($d \leq 16$ mm)	Min 1.25
			8 ($22 d \leq$ 25 mm)	180°	5 d ($19 \leq d \leq$ 25 mm)	
			7 ($d \leq 29$ mm)	180°	7 d ($29 \leq d \leq$ 36 mm)	
				90°	9 d ($d > 36$ mm)	
BjTS 420B	Min 420 Maks 545	Min 525	14 ($d \leq 19$ mm)	180°	3.5 d ($d \leq 16$ mm)	Min 1.25
			12 ($d \geq 36$ mm)	180°	5 d ($19 \leq d \leq$ 25 mm)	
			10 ($d \geq 36$ mm)	180°	7 d ($29 \leq d \leq$ 36 mm)	
				90°	9 d ($d > 36$ mm)	
BjTS 520	Min 520 Maks 645	Min 650	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5 d ($d \leq 25$ mm)	Min 1.25
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7 d ($29 \leq d \leq$ 36 mm)	
				90°	9 d ($d > 36$ mm)	
BjTS 550	Min 550 Maks 675	Min 687.5	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5 d ($d \leq 25$ mm)	Min 1.25
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7 d ($29 \leq d \leq$ 36 mm)	
				90°	9 d ($d > 36$ mm)	
BjTS 700	Min 700 Maks 825	Min 805	7 ($d \leq 25$ mm)	180°	5 d ($d \leq 25$ mm)	Min 1.15
			6 ($d \geq 29$ mm)	180°	7 d ($29 \leq d \leq$ 36 mm)	
				90°	9 d ($d > 36$ mm)	

Sumber: (Badan Standardisasi Nasional, 2002)

1.7.2 Momen inersia penampang retak

Seperti yang disebutkan sebelumnya, tulangan dan beton bekerja bersama pada daerah tarik sebelum beton retak (praretak). Oleh karena itu, untuk mengetahui nilai lendutan yang terjadi, digunakan nilai momen inersia penampang utuh. Ini dilakukan dengan asumsi bahwa beton tidak pecah, yang berarti momen inersia penampang masih utuh sepenuhnya. Rumus untuk menghitung momen inersia penampang utuh dapat ditemukan pada persamaan.

$$I_g = \frac{1}{12}bh^3 \quad (1)$$

Beton akan memasuki daerah pascaretak ketika terjadi retak pertama. Kekuatan tarik beton tidak berguna lagi ketika retak lentur terjadi. Selain itu, ini menunjukkan bahwa kekakuan lentur penampangnya telah berkurang, yang mengakibatkan kurva hubungan beban-defleksi menjadi lebih landai dibandingkan dengan taraf praretak. Pada titik ini, nilai momen inersia penampang retak I_{cr} digunakan. Nilai I_{cr} dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2).

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bc^3 + \frac{E_s}{E_c}A_s(d - c)^2 \quad (2)$$

1.7.3 *Limit states*

Ketika suatu struktur atau elemen struktur menjadi tidak layak dalam fungsinya, dapat dikatakan telah mencapai *limit states*nya, dimana *limit states* pada beton bertulang dapat dibagi menjadi tiga kelompok dasar:

Pertama, *ultimit limit states*, dimana mengalami keruntuhan struktural sebagian atau juga keseluruhan. *Limit states* seperti ini seharusnya mempunyai kemungkinan terjadi sangat minim, karena dapat berakibat hilangnya nyawa dan kerugian finansial yang besar. Kondisi *ultimit limit states* adalah, (a) hilangnya keseimbangan pada struktur sebagai benda tegar. Keruntuhan seperti ini umumnya menyebabkan seluruh struktur terguling atau tergrlincir dan akan terjadi jika reaksi yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan tidak dapat dikembangkan. (b) pecahnya bagian bagian penting dari struktur, menyebabkan keruntuhan sebagian atau seluruhnya. (c) keruntuhan progresif. Kelebihan beban satu komponen pada struktur tertentu dapat menyebabkan kegagalan komponen tersebut, beban yang tersalurkan pada elemen struktur di dekatnya menyebabkan elemen lainnya mengalami kelebihan beban sehingga menjadi gagal, serta hal ini terjadi secara berkelanjutan hingga struktur tersebut gagal satu demi satu, dan menjadi keruntuhan yang merugikan. (d) pembentukan mekanisme plastis. Mekanisme terbentuk ketika tulangan luluh membentuk sendi plastis pada bagian yang cukup untuk membuat struktur tidak stabil. (e) ketidakstabilan karena deformasi struktur. (f) *fatigue*. Patahnya elemen struktur akibat siklus tegangan berulang dari beban yang bekerja dan dapat menyebabkan keruntuhan.

Kedua, *serviceability limit states* hal ini mengakibatkan terganggunya fungsional struktur, namun tidak sampai pada keruntuhannya. Karena bahaya hilangnya nyawa lebih kecil, kemungkinan kejadian yang lebih tinggi secara umum dapat ditoleransi dibandingkan dalam kasus keadaan *limit states*. *Serviceability limit states* mencakup hal hal berikut. (a) lendutan yang berlebihan selama penggunaan

biasa. Lendutan yang berlebihan dapat mengakibatkan kerusakan peralatan, kerusakan secara visual, dan kerusakan pada elemen nonstruktural atau perubahan distribusi gaya. (b) lebar retakan yang berlebihan. Beton bertulang perlu retak sebelum tulangan dapat bekerja dengan baik, namun dimungkinkan untuk merancang tulangan sedemikian rupa sehingga mengurangi lebar retakan. Lebar yang berlebih menjadikan visual yang tidak menarik, serta dapat menyebabkan kebocoran dan korosi pada tulangan. (c) getaran yang tidak diinginkan. Getaran vertikal pada lantai atau jembatan serta getaran lateral dan puntir pada gedung tinggi dapat mengganggu pengguna.

Ketiga, *Special limit states*, kelas *limit states* ini mencakup kerusakan atau kegagalan akibat kondisi tidak normal atau pembebanan tidak normal dan mencakup (a) kerusakan akibat gempa bumi ekstrem. (b) akibat struktural dari kebakaran, ledakan atau tabrakan kendaraan. (c) akibat korosi pada struktur (d) ketidakstabilan fisik atau kimia jangka panjang. (Wight & Macgregor, 2012)

1.7.4 Standar pedomanan perencanaan beton bertulang

Pedoman perencanaan untuk beton bertulang dapat mengacu pada SNI 2847:2019 persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD), secara khusus mengenai balok dimuat pada pasal 9.

1.8 Desain balok persegi panjang yang diperkuat dengan tulangan

Desain struktur beton bertulang saat ini ditetapkan berdasarkan prinsip memastikan kekuatan yang memadai untuk menahan beban berlebih teoritis, Kekuatan nominal komponen struktur yang diusulkan ditentukan dengan menggunakan metode optimal. Pemahaman yang ada tentang bagian dan perilaku material. Kekuatan nominal disesuaikan dengan faktor reduksi kekuatan ϕ , yang kurang dari satu, untuk menentukan kekuatan desain. Untuk menentukan kekuatan yang diperlukan jika tahap kelebihan beban hipotesis terjadi, faktor beban γ , yang lebih dari satu, diterapkan pada beban yang diharapkan. Beban pelayanan yang diantisipasi terdiri dari beban mati yang dihitung, beban hidup yang dihitung atau ditentukan secara hukum, dan beban lingkungan seperti angin, aktivitas gempa bumi, atau suhu. Bagian beton bertulang dirancang menurut persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\phi M_n &\geq M_u \\ \phi P_n &\geq P_u \\ \phi V_n &\geq V_u\end{aligned}\tag{3}$$

Dimana:

n = kekuatan nominal pada lentur, aksial, dan geser

u = momen beban terfaktor, gaya aksial, dan geser

Komponen struktur yang dirancang untuk menahan tingkat tegangan tinggi selama skenario beban berlebih yang ekstrim juga harus berfungsi secara efektif ketika menerima beban layanan reguler. Lendutan harus dibatasi pada nilai yang sesuai, khususnya yang berkaitan dengan beton.

Retakan tarik, yang tidak dapat dihindari, harus tipis dan tersebar merata di seluruh area tarik. Setelah memastikan kekuatan yang cukup, defleksi dihitung dan dibandingkan dengan batas yang ditetapkan, sedangkan lebar patahan diatur dengan metode tertentu. Metode perancangan ini, yang dikenal sebagai perancangan negara-negara di Eropa dan sampai batas tertentu A_s , merupakan dasar dari kode (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016).

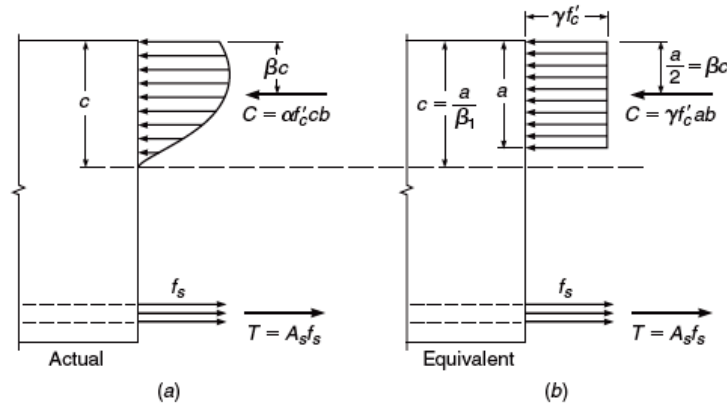
1.8.1 Distribusi tegangan persegi panjang

Temuan penelitian eksperimental dapat diterapkan pada skenario di luar balok persegi panjang yang diperkuat pada sisi tegangan. Hal ini dapat dimanfaatkan untuk memberikan solusi akurat untuk balok dengan bentuk penampang berbeda, diperkuat dengan berbagai cara, dan untuk komponen struktural lainnya.

Mengalami gabungan gaya lentur dan aksial (kompresi atau tarik). Persamaan yang relevan untuk skenario yang lebih rumit ini menjadi lebih memberatkan dan panjang. Perancang mungkin kesulitan menggambarkan dasar fisik untuk proses dan formula desain, yang dapat mengakibatkan ketergantungan buta pada formula dan kurangnya pemahaman yang sebenarnya. Hal ini tidak hanya merugikan secara umum, tetapi juga lebih rentan menyebabkan kesalahan numerik dalam pekerjaan desain ketika perancang selalu memiliki pemahaman komprehensif tentang situasi fisik bagian yang diukur atau dianalisis. Analisis kekuatan komponen struktur beton bertulang dapat dirumuskan ulang dengan cara yang lebih mudah divisualisasikan dan diterapkan, sehingga memberikan hasil yang sama seperti analisis umum tetapi dengan lebih sederhana, berkat trik konseptual. Konsistensi metode ini telah dibuktikan dan kesesuaiannya untuk skenario yang lebih rumit telah divalidasi melalui beberapa pengujian pada berbagai jenis struktur dan keadaan pembebanan (Whitney, 1937).

Pada bagian sebelumnya telah disebutkan bahwa distribusi tegangan tekan beton mempunyai bentuk geometri yang bervariasi. Tidak perlu mengetahui bentuk pastinya asalkan diketahui dua hal spesifik. Nilai C akibat tegangan tekan beton dan penempatannya. Data mengenai kedua nilai ini dikumpulkan melalui studi eksperimental dan diwakili oleh parameter α dan β .

Kita dapat mempertimbangkan untuk mengganti distribusi tegangan kompleks yang sebenarnya dengan bentuk geometri yang lebih sederhana, asalkan distribusi baru ini menghasilkan gaya tekan total C yang sama yang diterapkan pada posisi yang sama. Pada saat sebelum anggota tersebut gagal. Sepanjang sejarah, para peneliti dari berbagai negara telah menyarankan distribusi stres fiktif yang lebih sederhana. Metode yang diakui secara universal, sebagaimana diuraikan dalam kode ACI, awalnya disarankan oleh (Whitney, 1937) dan kemudian diperluas dan diverifikasi melalui eksperimen oleh beberapa peneliti. Gambar 2.1. menampilkan distribusi tegangan tepat sebelum keruntuhan dan distribusi hipotetis yang sebanding.



Gambar 1.1. Distribusi tegangan berbentuk persegi panjang pada beban ultimit yang nyata dan sebanding

Tabel 1.2. Parameter blok tegangan beton

	f'_c, psi				
	≤ 4000	5000	6000	7000	≥ 8000
α	0.72	0.68	0.64	0.60	0.56
β	0.425	0.400	0.375	0.350	0.325
$\beta_1 = 2\beta$	0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
$\gamma = \alpha/\beta_1$	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86

Sumber: (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016)

Distribusi tegangan aktual digantikan dengan distribusi tegangan ekuivalen yang mempunyai kontur dasar persegi panjang. Intensitas $\gamma f'_c$ dari tegangan konstan ekuivalen dan kedalamannya $a = \beta_1 c$ dapat dihitung dengan memastikan bahwa gaya tekan total C dan lokasinya dari serat atas konsisten dalam distribusi tegangan persegi panjang dan tegangan actual yang setara. Berdasarkan gambar 1.1. kondisi pertama memberi persamaan sebagai berikut

$$C = \alpha f'_c c b = \gamma f'_c a b \quad \text{dari mana} \quad \gamma = \alpha \frac{c}{a} \quad (4)$$

Mengingat $a = \beta_1 c$, maka hasilnya adalah $\gamma = \alpha/\beta_1$. kriteria kedua adalah bahwa gaya C pada blok tegangan persegi panjang analog harus ditempatkan pada jarak yang sama β_c dari serat atas seperti pada distribusi nyata. Oleh karena itu $\beta_1 = 2\beta$. Tegangan tekan γ Sebagian besar tidak dipengaruhi oleh f'_c dan dapat diasumsikan secara konsisten sebesar 0.85. oleh karena itu, berapapun f'_c , gaya tekan beton pada saat runtuh pada balok persegi panjang dengan lebar b adalah

$$c = 0.85 f'_c a b \quad (5)$$

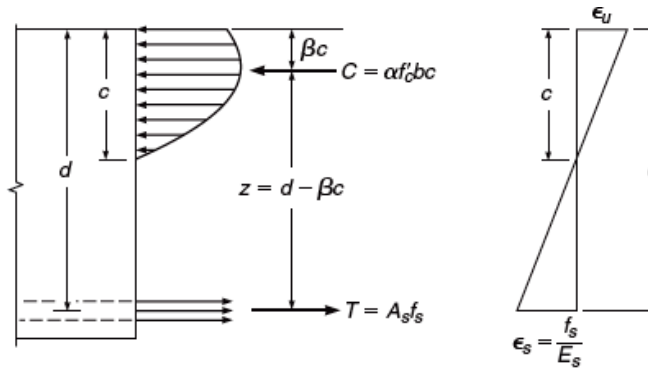
Untuk material beton tipikal dengan kuat tekan kurang dari atau sama dengan 4000 psi, kedalaman balok tegangan persegi panjang didefinisikan sebagai $\alpha = 0.85c$, dimana c mewakili jarak ke sumbu netral. Jarak untuk beton mutu tinggi adalah $a = \beta_1 c$, dengan nilai β_1 diberikan pada tabel 2.2. Penentuan ini sejalan dalam SNI 2847:2019, dimana untuk nilai f'_c kurang dari 28 MPa digunakan β_1 ditetapkan 0.85, untuk $f'_c \geq 55$ ditetapkan 0.65, sedangkan pada mutu beton $28 < f'_c < 55$ menggunakan β_1 yang dihitung berdasarkan **persamaan 6**

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{f'_c - 28}{7} \text{ dan } 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85 \quad (6)$$

Kondisi keruntuhan tetap tidak berubah: luluhnya baja pada $f_s = f_y$ atau hancurnya beton pada $\epsilon_u = 0.003$. karena kesederhanaannya fitur geometris blok tegangan persegi panjang, banyak perhitungan dilakukan tanpa bergantung pada persamaan turunan formal, seperti yang ditunjukkan pada bagian selanjutnya (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016).

1.8.2 Kondisi regangan seimbang

Rasio kekuatan ρ_b yang menghasilkan kondisi regangan seimbang dapat ditentukan berdasarkan dengan syarat, pada keruntuhan seimbang, regangan baja sama persis dengan ϵ_y ketika regangan pada beton secara bersamaan mencapai regangan hancur $\epsilon_u = 0.003$. berdasarkan gambar 1.2. dapat dirumuskan menjadi



Gambar 1.2. Distribusi tegangan dan regangan pada beban akhir

$$c = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u + \epsilon_y} d \quad (7)$$

Persamaannya dianggap sama dengan persamaan diatas. Dari kondisi kesetimbangan bahwa $C = T$

$$\rho_b f_y b d = 0.85 f'_c a b = 0.85 \beta_1 f'_c b c \quad (8)$$

$$\rho_b = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c c}{f_y d} = 0.85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_y} \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u + \epsilon_y} \quad (9)$$

$$\rho_b = \frac{\alpha f'_c}{f_y} \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u + \epsilon_y} \quad (10)$$

Secara mudah ditunjukkan pada persamaan 10 (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016).

1.8.3 Underreinforced beams

Kegagalan kompresi pada lentur, jika terjadi, hanya memberikan sedikit peringatan akan bahayanya, sedangkan kegagalan tarik, yang diawali oleh lelehnya baja, biasanya terjadi secara bertahap. Tekanan terlihat jelas dari pengamatan terhadap defleksi yang besar dan pelebaran retakan beton yang berhubungan dengan luluhnya tulangan baja, dan tindakan dapat diambil untuk menghindari keruntuhan total. Selain itu, sebagian besar balok yang keruntuhannya dimulai dengan luluh memiliki sifat yang dimiliki kekuatan substansial berdasarkan

pengerasan regangan pada baja tulangan, padahal sebenarnya tidak diperhitungkan dalam perhitungan M_n .

Karena perbedaan-perbedaan perilaku ini, maka sebaiknya untuk mensyaratkan bahwa balok dirancang sedemikian rupa hingga keruntuhan, jika terjadi, akan disebabkan oleh luluhnya baja, bukan karena hancurnya beton. Hal ini dapat dilakukan, secara teoritis, dengan mensyaratkan bahwa rasio penguatan p lebih kecil dari rasio keseimbangan p_b yang diberikan oleh Persamaan 9.

Dalam praktiknya, batas atas p harus berada di bawah p_b karena alasan berikut:

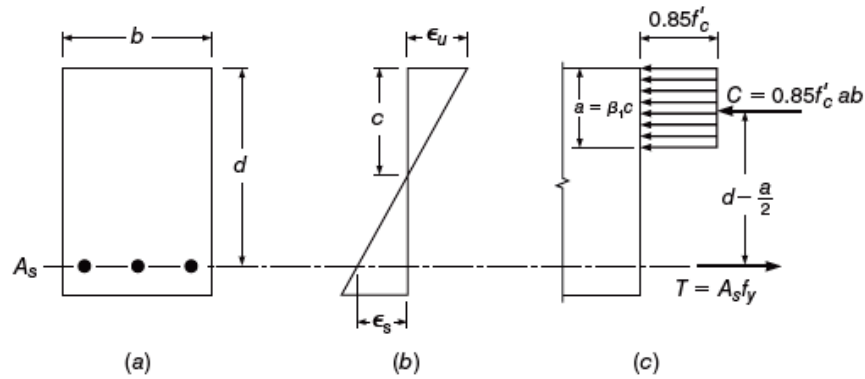
- Jika p sama dengan p_b , maka batas regangan tekan beton akan tercapai pada saat baja mencapai tegangan luluhnya, tanpa adanya leleh sebelum patah
- Karakteristik material tidak pernah diketahui secara pasti
- Pengerasan regangan pada baja tulangan, jika tidak dipertimbangkan dalam desain, dapat menyebabkan kegagalan getas pada tekan beton, meskipun p lebih rendah dari p_b .
- Luas baja aktual yang disediakan, dengan mempertimbangkan ukuran batang tulangan standar, akan selalu sama atau lebih besar dari yang dibutuhkan, berdasarkan rasio tulangan yang dipilih p , dan cenderung ke arah tulangan berlebih
- daktilitas ekstra yang diberikan oleh balok dengan nilai p yang lebih rendah meningkatkan kemampuan defleksi secara substansial dan dengan demikian memberikan peringatan sebelum terjadinya keruntuhan.
- daktilitas ekstra yang diberikan oleh balok dengan nilai p yang lebih rendah meningkatkan kemampuan defleksi secara substansial dan dengan demikian memberikan peringatan sebelum terjadinya keruntuhan (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016).

1.8.4 *Overreinforced beams*

Menurut Kode ACI, semua balok harus dirancang untuk menghasilkan tegangan yang dapat dilelehkan baja dengan ϵ_t tidak kurang dari 0.004 dan dengan demikian $p \leq p_{0.004}$. namun kadang-kadang, seperti ketika menganalisis kapasitas konstruksi yang ada, mungkin perlu dilakukan perhitungan kekuatan lentur dari komponen struktur yang dikontrol kompresinya dengan perkuatan berlebih, yang mana f_s kurang dari f_y pada keruntuhan lentur.

Dalam hal ini, regangan baja terlihat pada gambar 1.3. akan lebih kecil dari regangan luluh, namun dapat dinyatakan dalam regangan beton ϵ_u dan jarak ke c ke sumbu netral yang masih belum diketahui:

$$\epsilon_s = \epsilon_u \frac{d-c}{c} \quad (11)$$



Gambar 1.3. Balok persegi panjang bertulang tunggal

Dari syarat kesetimbangan bahwa $C = T$, dapat dituliskan

$$0.85\beta_1 f'_c b c = \rho \epsilon_s E_s b d \quad (12)$$

Mengganti regangan baja dari persamaan 12 pada persamaan terakhir, dan mendefinisikan $k_u = c/d$, diperoleh persamaan kuadrat dalam k_u sebagai berikut:

$$k_u^2 + m \rho k_u - m \rho = 0 \quad (13)$$

Di sini, $\rho = A_s/bd$ seperti biasa, dan m adalah parameter material yang diberikan oleh

$$m = \frac{E_s \epsilon_u}{0.85\beta_1 f'_c} \quad (14)$$

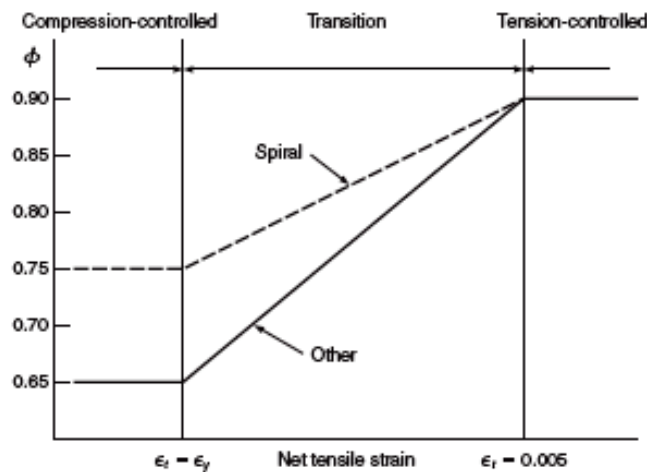
Menyelesaikan persamaan kuadrat untuk k_u ,

$$k_u = \sqrt{m \rho + \left(\frac{m \rho}{2}\right)^2} - \frac{m \rho}{2} \quad (15)$$

Kedalaman sumbu netral untuk balok yang diperkuat berlebih kemudian dapat dengan mudah ditemukan dari $c = k_u d$, setelah itu kedalaman blok tegangan $a = \beta_1 c$. dengan regangan baja ϵ_s kemudian dihitung dari persamaan 12, dan dengan $f_s = E_s \epsilon_s$, kuat lentur nominalnya adalah

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (16)$$

Faktor reduksi kekuatan Φ akan sama dengan 0.65 untuk balok dalam rentang ini atau sedikit lebih tinggi jika regangan tarik bersih berada pada zona transisi yang ditunjukkan pada gambar 1.4. (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016).



Gambar 1.4. Variasi faktor reduksi kekuatan berdasarkan regangan tarik pada baja

1.9 Kapasitas lentur balok beton bertulang

Kapasitas lentur balok beton bertulang adalah kemampuannya untuk menahan momen lentur sebelum runtuh. Kapasitas ini dihitung dengan menggunakan rumus berikut

$$Mn = A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (17)$$

Dimana:

Mn = Kapasitas lentur balok (kNm)

A_s = Luas penampang tulangan tarik (mm^2)

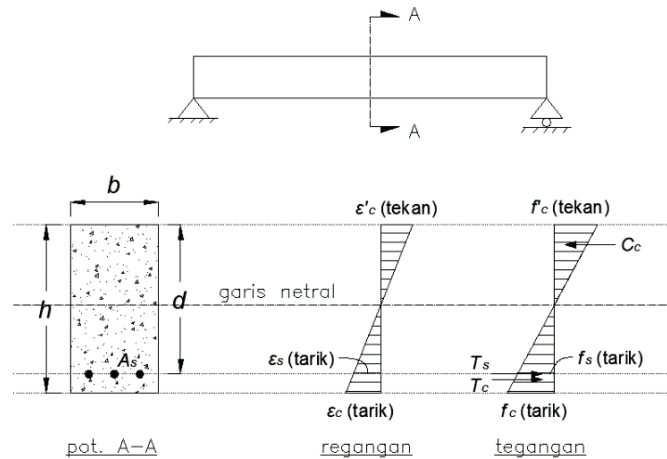
f_y = Tegangan luluh tulangan tarik (MPa)

d = Tinggi efektif balok (mm)

a = Tinggi balok dari tulangan tarik ke tepi paling atas balok (mm)

Balok beton bertulang adalah komponen struktural yang dirancang untuk menahan gaya lentur akibat beban. Peningkatan beban akan menyebabkan nilai regangan dan defleksi balok meningkat, sehingga menimbulkan terjadinya retakan lentur sepanjang bentang balok. Penambahan beban secara bertahap akan menyebabkan elemen struktur gagal ketika beban eksternal melebihi kapasitas elemen balok.

Kondisi tegangan dan regangan beton akibat pembebanan akan disajikan secara lebih mendalam untuk meningkatkan pemahaman. Tegangan pada daerah tekan beton berbanding lurus dengan regangan sampai suatu tingkat pembebanan tertentu pada kondisi $0,45 f'_c$. Pada tingkat pembebanan ini, peningkatan beban lebih lanjut akan menyebabkan hilangnya hubungan proporsional, sehingga mengakibatkan diagram tegangan tekan pada penampang balok beton menyerupai kurva tegangan-regangan beton.

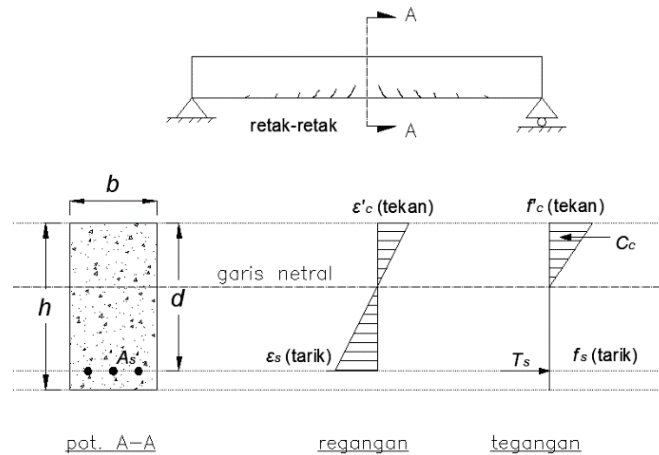


Gambar 1.5. Perilaku lentur pada beban sebelum retak

Hal ini dijelaskan pada Gambar 1.5. Sebelum terjadi keretakan pada beton akibat keadaan pembebanan, beton dan baja tulangan bekerja sama untuk menahan gaya tarik, sedangkan beton pada sisi tekan hanya menahan gaya tekan. Dalam skenario ini, distribusi tegangan tetap linier, dengan nilai nol pada garis netral dan berbanding lurus dengan nilai regangan. Hal ini hanya terjadi bila tegangan maksimum pada sisi tarik tetap relatif rendah, di bawah nilai modulus keruntuhan.

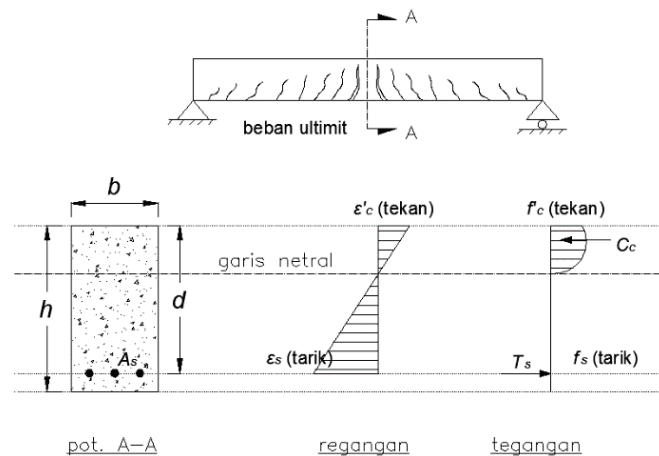
Selama pembebanan setelah retak, ketika gaya yang diterapkan melebihi nilai beban sebelum pembentukan retakan, kekuatan tarik beton terlampaui, sehingga menimbulkan retakan garis rambut, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.6. Karena luasnya retakan, beton tidak mampu meneruskan gaya tarik melintasi area retakan, sehingga menyebabkan terganggunya distribusi tegangan di sepanjang sisi tarik beton.

Akibatnya distribusi tegangan tarik pada area beton yang retak akan terhenti dan sepenuhnya ditanggung oleh baja tulangan. Tulangan akan mulai berubah bentuk ketika terkena tarikan, dan jika beban ditambah lagi, tulangan tersebut akan mencapai titik lelehnya. Distribusi tegangan tarik pada tulangan ini meluas sampai batas $0,5 f_c$. Dalam skenario ini, nilai tegangan beton tekan tetap berbanding lurus dengan nilai regangan, mengikuti model tegangan blok segitiga seperti yang digambarkan pada Gambar 1.6.



Gambar 1.6. Perilaku lentur beton setelah retak

Semakin tinggi nilai beban maka nilai regangan dan tegangan tekan akan semakin besar sehingga menyebabkan menyimpang tidak berbanding lurus sehingga mengakibatkan tegangan tekan beton membentuk kurva nonlinier.



Gambar 1.7. Perilaku lentur pada beban ultimit

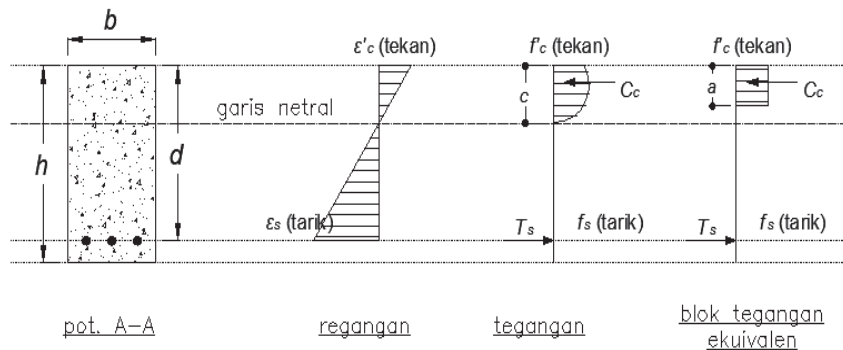
Kurva tegangan di atas garis netral penampang balok atau pada daerah tekan balok akan mencerminkan bentuk kurva tegangan-regangan beton yang ditunjukkan pada Gambar 1.7. Distribusi tegangan berbentuk garis lengkung dengan nilai nol pada garis netral.

Gambar 1.7 menampilkan model distribusi tegangan dan regangan yang terjadi pada tingkat pembebanan yang mendekati pembebanan ultimit. Kelengkungan distribusi tegangan yang melengkung mempersulit perhitungan volume balok tegangan tekan.

Model persegi Whitney tahun 1937 mengusulkan penggunaan blok tegangan persegi panjang yang setara untuk menghitung gaya kompresi secara akurat. Balok tegangan mempunyai tinggi 'a' dan tegangan tekan rata-rata sebesar 0,85 kali kuat

tekan karakteristik (f'_c). Angka tersebut diperoleh dari data percobaan yang diperoleh dari beton yang telah melampaui umur 28 hari.

Dengan menggunakan asumsi-asumsi di atas, penghitungan tegangan tekan volume balok dapat disederhanakan dengan menerapkan rumus dasar volume balok. Gambar 1.8. menampilkan bentuk blok tegangan ekuivalen ini. Melebihi kapasitas batas kuat beton pada daerah tekan akan menyebabkan balok runtuh. Pada titik ini, tampaknya mencapai kapasitas maksimum adalah operasi satu kali karena beton telah melampaui keadaan elastisnya.



Gambar 1.8. Blok tegangan ekuivalen

Komponen struktur dengan balok retak dan baja tulangan yang meleleh menunjukkan nilai defleksi yang signifikan. Deformasi signifikan pada balok tidak akan kembali ke keadaan semula akibat benturan baja tulangan yang meleleh. Ketika menentukan kapasitas momen ultimit suatu komponen struktur, kekuatan tarik beton biasanya diabaikan. Gaya tarik hanya ditransfer ke baja tulangan pada daerah tarik.

Bentuk penampang beton pada daerah tarik tidak berpengaruh terhadap kuat lentur. Tinggi penampang yang digunakan untuk menentukan adalah tinggi efektif d , yaitu jarak serat tekan terluar sampai titik berat tulangan tarik. Nilai regangan tekan maksimum beton pada serat tekan terluar dibatasi sebesar 0,003. Angka tersebut ditentukan berdasarkan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa regangan pada beton pecah biasanya berkisar antara 0,003 hingga 0,004 (Maulidya, 2022).

1.10 Retak pada beton

1.10.1. Retak struktur

Retak struktur terjadi akibat penurunan bidang pendukung (*settlement*), yang dapat berupa tanah, pondasi, maupun elemen struktur lainnya. Penurunan pada suatu bangunan biasa terjadi, tetapi akan timbul masalah jika penurunan tersebut terjadi tidak secara bersamaan, sehingga terjadi perubahan elevasi yang tidak seragam. Pada bangunan rumah sederhana satu lantai, *sloof* dan *ring balk* menjadi elemen yang sangat penting untuk mengikat struktur menjadi satu bagian yang solid. Penurunan *settlement* umumnya terjadi pada dua tempat yang berbeda, yaitu pada sudut-sudut dinding atau pada ujung dinding yang retak. Keretakan ini disebabkan oleh penurunan bidang susut atau ujung dinding, akibat penurunan satu bidang

karena perbedaan bidang pendukung dan daya dukungnya, atau akibat pemadatan tanah yang tidak merata.

Karakteristik lain dari retak jeni ini adalah keretakan akan lebih lebar pada bagian atas dan semakin menyempit pada bagian bawah. Disamping akibat pemadatan yang tidak merata, keretakan jenis ini juga dapat disebabkan karena erosi tanah dibawah fondasi akibat aliran air di dalamnya, oleh sebab itu, perlu dilakukan control terhadap aliran air di sekitar fondasi. Penyebab lainnya adalah pembebanan pada dinding yang tidak merata sehingga menimbulkan beban terkonsentrasi pada satu bagian, sedang pada bidang lainnya tidak.

Pada rumah sederhana, pembebanan yang berlebih biasanya terjadi dari peletakan beban kuda-kuda yang tidak dapat langsung diterima oleh kolom dibawahnya, tetapi meletakkan beban kuda-kuda pada dinding. Retak jenis ini mempunyai tipe yang berbeda dari retak yang sudah diuraikan tadi, yaitu keretakan yang timbul lebih kuat daripada retak pada bagian dinding yang lain (Hidayat, 2009).

1.10.2. Retak nonstruktural

Retakan nonstruktural dapat timbul akibat tekanan internal pada material konstruksi. Retakan ini tidak berdampak langsung terhadap integritas struktur.

Crazing termasuk jenis retak nonstruktur yang terjadi akibat plesteran yang terlalu banyak di *trowel* dan pasir yang digunakan banyak mengandung butiran halus. Retak *crazing* mempunyai ciri-ciri sebagai berikut.

- Membentuk jaringan retak yang halus, dangkal, dan tidak bersambung.
- Membentuk pola heksagonal dengan jarak retak 5 mm sampai 75 mm.
- Terjadi dalam selang waktu beberapa jam setelah aplikasi plesteran.
- Retak sulit terlihat sampai debu atau uap air membuat retak terjadi terlihat.

Selain retak *crazing*, jenis retak lainnya adalah *map cracking*. *Map cracking* terjadi akibat terlalu banyak menggunakan semen. Selain itu, plesteran yang dibiarkan terlalu cepat mengering akibat kehilangan air yang berlebihan juga menyebabkan terjadinya retak jenis ini. Kehilangan air dapat disebabkan oleh penguapan bila dinding tidak terlindungi dari sinar matahari dan angin, terserap ke dalam tembok, dan pasir kekurangan butiran halus. *Map cracking* mempunyai ciri jaringan retak yang menyerupai peta (*map*), membentuk pola heksagonal dengan jarak sampai 200 mm. ciri lainnya adalah struktur retak cenderung lebih dalam dan bersambung

Retak susut sering dijumpai di sekitar dinding bagian tengah yang mempunyai bentang daerah sekitar pertemuan antara dinding dan pintu atau jendela. Retak susut terjadi akibat kandungan semen yang tinggi, mutu pasir yang buruk, plesteran yang diaplikasikan terlalu tebal. Beberapa tipe retak susut menurut penyebabnya sebagai berikut.

- Susut karena gaya kapiler pada saat campuran dalam keadaan plastis atau masih basah (susut plastis). Susut plastis terjadi akibat kehilangan air yang berlebihan saat plaster masih dalam kondisi plastis atau awal aplikasi.
- Susut karena pengeringan (*drying shrinkage*), terjadi akibat hilangnya air pada saat proses pengeringan (susut kering). Retak susut kering terjadi akibat

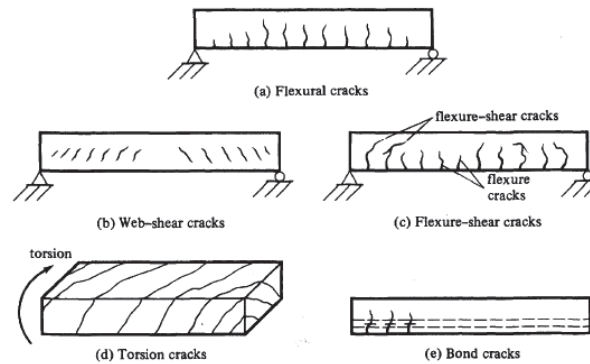
kandungan semen yang tinggi, mutu pasir yang buruk, dan plester yang diaplikasikan terlalu tebal.

- Susut yang disebabkan karena perubahan volume plesteran maupun beton pada saat terjadi proses reaksi kimia antara semen dan air
- Susut karena karbonas, terjadi pada saat dinding/beton yang sudah mengeras. Susut ini terjadi akibat masuknya gas karbondioksida (CO_2) ke dalam pori plesteran/beton (Hidayat, 2009).

1.10.3. Jenis retak

Menurut Jack dan James retak yang terjadi pada balok beton bertulang dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis

- Retak lentur (*flexural cracks*), adalah retakan vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok sampai ke daerah sumbu netralnya, seperti pada gambar 1.9.(a) jika balok mempunyai tinggi yang sangat dalam (lebih dari 0.9144 atau 1.2192 m), jarak retakan akan sangat rapat, dengan beberapa di antaranya menyatu di atas tulangan dan beberapa menghilang disana. Retakan ini mungkin lebih lebar di bagian Tengah balok dibandingkan di bagian bawah.
- Retakan miring akibat geser dapat terbentuk pada jaringan balok beton bertulang baik sebagai retakan tersendiri maupun lanjutan dari retak lentur. Secara tidak teratur, retakan miring dapat terbentuk secara terpisah pada suatu balok, meskipun tidak terdapat retakan lentur pada area tersebut. Retak geser badan (*web-shear cracks*), seperti ditunjukkan pada Gambar 1.9.(b), dapat terjadi pada badan bagian pratekan, terutama pada struktur dengan sayap lebar dan badan tipis.
- Retak geser lentur (*flexure-shear cracks*), merupakan jenis retakan geser miring yang umum, seperti pada gambar 1.9.(c) hal ini sering terjadi pada balok pratekan dan nonpratekan.
- Retak torsi (*torsion cracks*), digambarkan pada gambar 1.9.(d) menyerupai retakan geser tetapi berbentuk spiral sepanjang balok. Jika suatu bagian beton polos terkena torsi murni, maka akan terjadi retakan dan akhirnya runtuh sepanjang garis spiral 45° yang disebabkan oleh tegangan diagonal akibat tegangan punter. Untuk mendemonstrasikan bentuk kegagalan ini secara efektif, ambil sepotong kapur dan putar hingga pecah. Tegangan puntir, serupa dengan tegangan geser, terjadi pada semua permukaan elemen struktur. Akibatnya, tegangan geser meningkat di satu sisi dan menurunkannya di sisi lain.
- Delaminasi, tegangan ikatan antara beton dan baja tulangan menyebabkan keretakan sepanjang tulangan, seperti digambarkan pada **Gambar 1.9.(e)** (McCormac & Nelson, 2006)



Gambar 1.9. Jenis retak menurut jack dan james (McCormac & Nelson, 2006)

1.10.4. Lebar retak yang diizinkan

Lebar retak maksimum yang diizinkan pada suatu elemen struktur bergantung pada fungsi khusus elemen tersebut dan kondisi lingkungan elemen struktur tersebut. Tabel 1.2., dari *ACI Committee 224* memberikan petunjuk mengenai lebar retak maksimum yang diizinkan untuk berbagai kondisi lingkungan. Untuk menentukan lebar retak yang masih dapat ditoleransi, diperlukan juga suatu *engineering judgement* (kebijakan rekayasa).

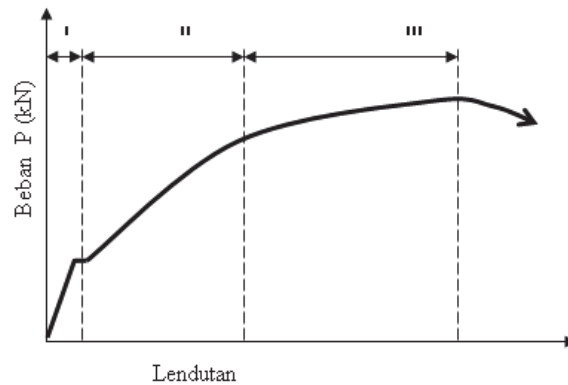
Tabel 1.2. Lebar retak yang diizinkan

Kondisi lingkungan	Lebar retak toleransi	
	in.	mm
Udara kering atau membrane terlindung udara lembab, tanah	0.016	0.41
Senyawa kimia	0.012	0.30
Air laut, basah maupun kering	0.007	0.18
Struktur penahan air	0.006	0.15
(tidak termasuk pipa tak bertekanan)	0.004	0.10

Sumber: (Nawy & Suryoatmono, 1998)

1.11 Perilaku defleksi pada balok

Seperti terlihat pada gambar 1.10., hubungan beban-lendutan balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealkan menjadi bentuk trilinear. Sebelum terjadi putus, sambungan ini terbagi menjadi tiga daerah (Nawy & Suryoatmono, 1998).



Gambar 1.10. Hubungan beban-defleksi pada balok (Nawy & Suryoatmono, 1998)

- Daerah I: Taraf praretak, tidak ada retakan pada komponen struktur. Bagian pra-retak kurva beban-defleksi adalah garis lurus yang menunjukkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil dari modulus pecah (f_r) beton atau kuat tarik akibat lentur. Momen inersia penampang balok tidak retak dan modulus young (E_c) beton dapat digunakan untuk memperkirakan kekakuan lentur EI balok.

$$E_c = 0.043w_c^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (18)$$

Untuk beton normal

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (19)$$

Modulus elastisitas baja

$$E_s = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \text{ (MPa)} \quad (20)$$

Meninjau kontribusi tulangan (A_s) diperlukan untuk estimasi momen inersia (I) yang akurat. Karena E_s lebih besar dari E_c , hal ini dapat dicapai dengan menukar luas baja dengan luas beton yang setara $(E_s/E_c)A_s$.

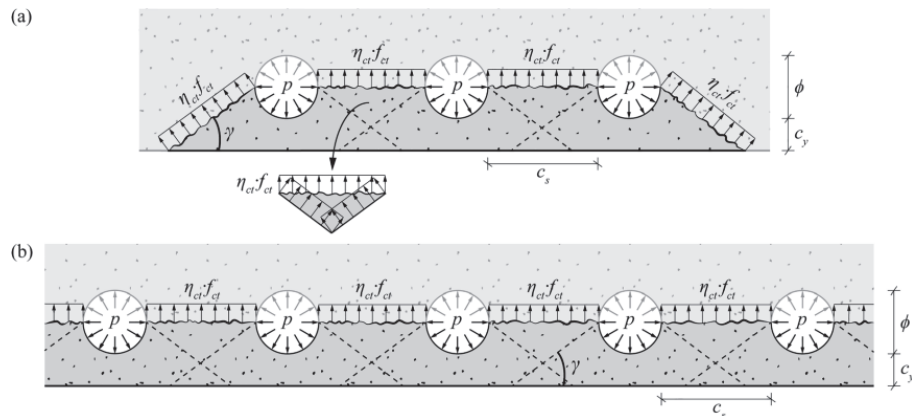
- Daerah II: Taraf beban pascaretak mengacu pada retak terkendali pada elemen struktur yang menunjukkan lebar dan distribusi yang diijinkan. Meskipun hanya retakan kecil dan sempit yang mungkin terjadi pada tumpuan, namun balok pada tumpuan dasar akan mengalami retakan yang lebih luas pada area lapangan. Dapat dikatakan bahwa retak lentur telah menghilangkan kontribusi apa pun terhadap kekuatan tarik beton. Kurva beban-lendutan pada daerah ini akan lebih curam dibandingkan pada daerah sebelum retak karena hal ini juga menunjukkan bahwa kekakuan lentur penampang telah berkurang. Istilah I_{cr} mengacu pada momen inersia retakan.
- Daerah III: taraf retak *pasca-serviceability*, tingkat patah yang terjadi setelah kemampuan layan, dimana tegangan tulangan tarik telah mencapai tegangan luluhnya. Dibandingkan area sebelumnya, diagram defleksi beban area III jauh lebih datar. Hal ini diakibatkan oleh hilangnya kekuatan penampang yang disebabkan oleh retakan-retakan yang banyak dan tersebar luas sepanjang bentang. Tanpa adanya tegangan ekstra, regangan ϵ_s pada tulangan sisi tarik akan terus meningkat melebihi regangan leleh ϵ_y jika beban ditingkatkan lebih lanjut. Suatu balok dianggap gagal secara struktural jika tulangan tariknya

terlepas. Tanpa adanya beban lebih lanjut, balok ini akan terus dibelokkan, dan retakan akan melebar hingga garis netral mendekati tepi tegangan. Akhirnya terjadi keruntuhan tekan sekunder yang menyebabkan beton pada daerah momen maksimum runtuh seluruhnya. Hal ini segera diikuti dengan terjadinya *rupture*

1.12 *Spalling* pada beton bertulang

Korosi pada tulangan merupakan salah satu faktor yang berkontribusi terhadap menurunnya kekuatan struktur konstruksi beton seiring berjalannya waktu. Korosi pada tulangan menyebabkan retak dan terkelupasnya beton. Meningkatnya volume tulangan yang menekan beton mengakibatkan terjadinya *spalling*, yaitu munculnya retakan permukaan secara progresif. Selain itu, korosi mengurangi luas tulangan, sehingga menurunkan kapasitas elemen struktur. Oleh karena itu, tulangan yang rusak harus diganti dengan tulangan luar. Diperlukan teknik pembangunan kembali dan perkuatan yang tepat guna mengatasi berbagai kerusakan yang terjadi (Said, Djamaluddin, & Irmawaty, 2023).

Karena kelebihan klorida pada antarmuka antara beton dan tulangan, lapisan pasif menjadi rusak. Untuk merusak lapisan pasif baja tulangan, diperlukan batas konsentrasi *critical chloride content (CCC)*. Terjadi reaksi oksidasi antara permukaan logam dan udara selama proses korosi, seperti terlihat pada Gambar 1.11. Karat terjadi pada logam karena adanya uap air di udara. Perkembangan pengelupasan beton juga dipengaruhi oleh banyak faktor iklim, seperti kadar air, suhu tinggi, dan korosi (Moccia, Ruiz, & Muttoni, Spalling of concrete cover induced by reinforcement, 2021).



Gambar 1.11. Mekanisme kegagalan *spalling* pada kasus beberapa bukaan yang jaraknya berdekatan: (a) kotak dengan tiga bukaan; dan (b) kotak dengan jumlah bukaan yang banyak

Selain pertimbangan lingkungan, pemasangan yang tidak memadai juga dapat menyebabkan beton terkelupas. Hal ini dapat terjadi karena beban struktural yang tinggi pada elemen beton atau kurangnya daya rekat dan kualitas beton akibat pencampuran yang tidak merata. Konsolidasi yang efektif dicapai dengan memastikan bahwa beton memiliki konsistensi yang sesuai dan dengan memberikan

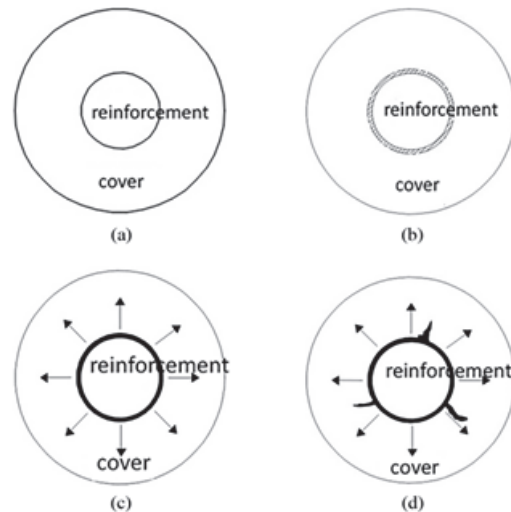
getaran pada beton basah sebelum pengerasan awal. Beton dengan viskositas tinggi (kadar air rendah) biasanya gagal melakukan konsolidasi secara efektif, sehingga mengakibatkan adanya gelembung udara dan ruang kosong pada struktur akhir. Jika rongga-rongga ini (disebut kantong batu) cukup besar atau tersebar di seluruh konstruksi dinding, air dapat dengan mudah menyusup ke dinding yang telah selesai dan bersentuhan dengan tulangan, sehingga menyebabkan korosi (Jansson, 2008).

Permulaan keruntuhan pada beton bertulang ditandai dengan timbulnya keretakan. Hal ini menandakan bahwa material beton akan mengalami penurunan kekuatan apabila mendapat beban tarik. Meskipun terdapat baja tulangan di dalam elemen beton, yang berfungsi untuk menahan gaya tarik dan geser serta mencegah terbentuknya retakan, namun terdapat kondisi tertentu yang menyebabkan retakan tidak dapat dihindari (Zandi, 2015)

Retak pada struktur beton disebabkan oleh adanya tegangan tarik yang melebihi kemampuan beton. Dalam disertasinya, Sutrisno (2017) menegaskan bahwa beton mengalami tiga tahap retak yang berbeda-beda, yaitu: patah mikro, retak meso, dan retak makro. Retakan mikro merupakan retakan yang timbul pada saat proses hidrasi semen sehingga mengakibatkan terbentuknya retakan pada pasta semen. Patah tulang mikroskopis hanya terlihat melalui penggunaan mikroskop elektron. Retakan meso adalah retakan yang terjadi pada rongga antara agregat dan pasta semen. Pada tingkat retakan makro, retakan terjadi pada mortar di antara agregat (Sutrisno, 2017).

Seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 1.12.**, sering kali terdapat tiga tahap keretakan beton yang berhubungan dengan korosi: karat, tegangan, dan keretakan penutup beton (Dai, Wang, Zhang, & Zhang, 2015). Proses korosi pada tulangan dimulai dengan reaksi kimia antara permukaan inert baja dan larutan asam yang berasal dari beton (Wang, et al., 2014).

klorida yang berlebihan pada antarmuka antara beton dan baja menyebabkan depassivasi, yang merusak lapisan pasif pada tulangan dan melemahkan hubungan antara tulangan dan beton. Setelah depassivasi terjadi, karat diperkirakan akan menutup pori-pori pada antarmuka antara baja dan beton. Saat ini, karat tidak menyebabkan peningkatan tegangan, namun ukurannya yang semakin besar menyebabkan semakin banyak pori-pori beton terisi dengan karat. Karat yang terakumulasi dan menempati celah antara permukaan baja dan beton menyebabkan peningkatan tegangan dan regangan pada antarmuka antara kedua material. Retakan pada lapisan beton terjadi ketika tegangan tarik meningkat.



Gambar 1.12. Tahapan terjadinya retak akibat korosi: (a) kondisi awal (b) tulangan mulai terkorosif (c) korosi membesar pada pertemuan beton dan tulangan (d) retak muncul pada selimut beton

1.13 *Grouting* pada beton bertulang

Grouting adalah prosedur di mana cairan disuntikkan secara paksa ke dalam rongga, celah, dan retakan pada batuan atau tanah, setelah uji injeksi tekanan tinggi. Selama periode tertentu, cairan mengalami transformasi fisik dan kimia, memadat menjadi padat.



Gambar 1.13. Perbaikan dan *finishing* dengan material *grouting* (the constructor, 2018)

Selain itu, grouting merupakan cara perbaikan dengan cara menyuntikkan campuran dempul semen dan nat beton yang tidak menyusut. Grouting menawarkan beberapa keuntungan, seperti fluiditas yang sangat baik untuk penuangan yang mudah, kekuatan tekan yang kuat, kekuatan lentur, dan daya rekat. Ia juga bebas dari klorin, yang dapat menyebabkan korosi, dan menunjukkan stabilitas bentuk yang baik. Produk dalam kondisi sangat baik, bebas dari sifat berminyak, tidak berbahaya, dan tidak menyebabkan karat. Grouting dapat dikategorikan menjadi enam kategori berbeda, yaitu:

1.13.1 *Permeation grouting* atau sementasi penembusan

Permeation grouting adalah teknik di mana bahan grouting dengan viskositas rendah disuntikkan ke dalam tanah atau batu melalui lubang yang dibor. Bahan grouting berfungsi untuk mengisi pori-pori kecil pada material tanah sehingga meningkatkan kekuatan, stabilitas, dan permeabilitasnya.

1.13.2 *Compaction grouting* atau sementasi pemadatan

Compaction grouting adalah suatu metode untuk meningkatkan kualitas tanah dengan memasukkan secara paksa bahan grouting yang sangat kaku ke dalam tanah. Teknik *grouting* ini dirancang untuk meningkatkan kemampuan menahan beban tanah. Penggunaan metode pemadatan ini untuk grouting tidak menjamin pencegahan rembesan secara menyeluruh. Namun demikian, metode grouting khusus ini dapat menyebabkan peningkatan beban tanah akibat pemadatan tanah.

1.13.3 *Fracture grouting* atau sementasi rekahan

Sementasi rekahan melibatkan penyuntikan cairan suspensi atau bahan grouting bubuk ke dalam rekahan hidrolis di dalam tanah. Tujuan dari grouting ini adalah untuk menjalin sambungan antar lensa yang telah di grout dan memberikan dukungan. Grouting retakan biasanya dilakukan pada tanah yang memiliki permeabilitas rendah, seperti tanah liat.

1.13.4 *Mixing/Jet grouting* atau sementasi campuran

Grouting jenis ini adalah metode remediasi tanah yang melibatkan penggunaan jet bertekanan tinggi untuk mengikis tanah dan menyuntikkannya dengan jet monitor pada saat yang bersamaan. Metode grouting khusus ini cocok untuk tujuan penyemenan di sekitar pilar atau pondasi.

1.13.5 *Fill grouting* atau sementasi pengisi

Sementasi pengisi, juga dikenal sebagai *fill grouting*, adalah proses yang melibatkan penggunaan mesin khusus bersama dengan beton atau mortar. Rongga atau retakan yang tercipta baik secara alami maupun sengaja akan diisi dengan bahan *grouting*, kemudian retakan atau rongga tersebut akan ditutup secara permanen.

1.13.6 *Vacuum grouting* atau sementasi vakum

Sementasi vakum adalah metode sementasi yang melibatkan penarikan material *grouting* ke area yang rusak dengan menggunakan alat penyedot. Sebelumnya, kerusakan akibat tekanan barometrik perlu diisolasi terlebih dahulu untuk menciptakan ruang hampa. Hal ini akan memungkinkan material grouting dapat ditarik dengan aman dan lancar ke area yang rusak.

1.14 Perlakuan *Antarmuka* pada perbaikan beton *spalling*

Penanganan yang tepat terhadap kerusakan permukaan beton sangat penting untuk efektivitas perbaikan dalam jangka panjang. Persiapan permukaan yang

menyeluruh sangat penting untuk mencapai lekatan yang kuat antara bahan perbaikan dan beton yang ada, sehingga mencegah pengelupasan dan kebocoran pada area yang diperbaiki.

1.14.1 *Sand blasting*

Sand blasting bermanfaat dalam teknik perbaikan beton yang terkelupas karena meningkatkan daya rekat antara beton lama, material grouting baru, dan tulangan yang terkorosi, yang dibersihkan secara menyeluruh melalui proses *sand blasting*. *Sand blasting* adalah teknik yang digunakan untuk membersihkan permukaan beton yang mengalami kerusakan atau kurang stabil. Prosedur sandblasting melibatkan penerapan pasir atau partikel abrasif ke permukaan beton menggunakan tekanan yang kuat. Proses pembersihan debu yang ketat ini akan secara efektif menghilangkan banyak lapisan kotoran, kotoran, dan ketidakrataan yang menempel pada permukaan beton.

Sand blasting adalah proses penyemprotan material dengan bahan abrasif, biasanya berupa pasir silika atau steel grit dengan tekanan tinggi pada suatu permukaan dengan tujuan untuk menghilangkan material-material seperti karat, cat, garam, dan oli yang menempel (Trethewey & Chamberlain, 1991).

Hal-hal yang menentukan hasil sand blasting antara lain adalah keahlian operator, tekanan udara untuk penyemprotan, ukuran pasir yang digunakan, waktu penyemprotan, dan jarak penyemprotan (Metabrasive, 2009).

Selain itu proses ini juga bertujuan untuk membuat kekasaran pada permukaan logam yang optimal sehingga bahan pelapis seperti cat lebih melekat dan produk tersebut akan lebih tahan terhadap korosi. Korosi sendiri terjadi akibat kerusakan atau mudarnya logam paduan oleh reaksi kimia atau elektrokimia dengan lingkungannya. Jadi apabila suatu produk tidak tahan terhadap korosi maka tentu akan menurunkan umur pemakaian produk. Tingkat kekasaran permukaan benda kerja yang akan dilakukan pelapisan adalah sangat penting, mengingat tingkat kekasaran akan sangat berpengaruh terhadap daya lekat bahan pelapis terhadap logam yang akan dilapisi. Ketika permukaan suatu material dikasari, maka akan terjadi peningkatan titik-titik kimia yang ditandai dengan peningkatan ikatan kimia (Khorasanizadeh, 2010).

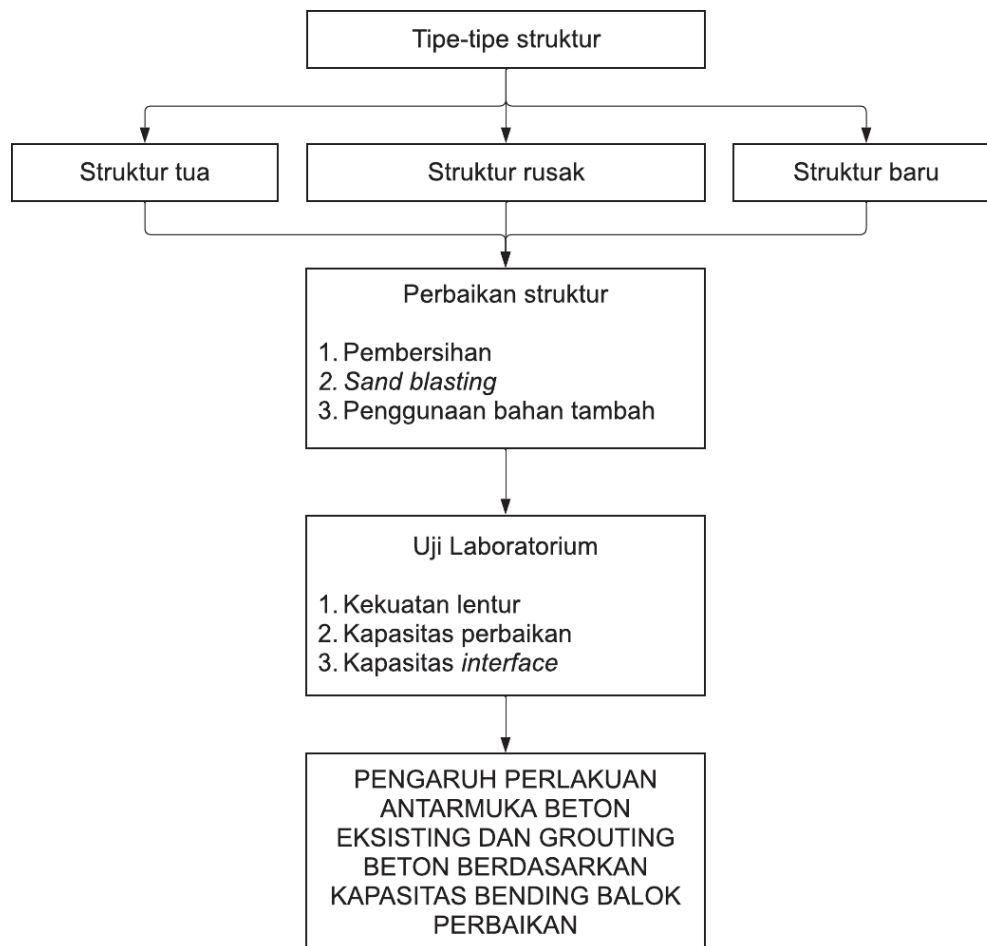
Berdasarkan penjelasan dan tinjauan sebelumnya, *sand blasting* diharapkan dapat meningkatkan daya rekat antara beton lama, tulangan, dan material grouting baru dengan membersihkan tulangan secara efektif. Proses pembersihan ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas oksidasi bahan penguat yang sebelumnya berkarat dan memungkinkan terjadinya reformasi. Pembentukan *passive film* pada tulangan dilakukan untuk mencegah dan meningkatkan korosi di kemudian hari. Meskipun penelitian mengenai hal ini masih terbatas, namun (Badan Standardisasi Nasional, 2016) yang mengatur spesifikasi beton struktur memuat ketentuan bahwa permukaan beton akan diberi tekstur dengan cara sandblasting untuk memenuhi persyaratan ketahanan lekat. Temuan ini menunjukkan bahwa *sand blasting* berpotensi berfungsi sebagai teknik perbaikan beton, yang berpotensi meningkatkan daya rekat.

1.14.2 Bahan Tambah untuk permukaan beton dan *grouting* baru

Bahan tambahan dipakai untuk mengubah sifat-sifat beton, membuat beton lebih mudah dikerjakan; awet; lebih ekonomis; menambah atau mengurangi waktu pengikatan; mempercepat kekuatan dan atau mengontrol panas hidrasi. Bahan tambahan kimia digunakan setelah dilakukan evaluasi secara cermat. Bahan tambahan/ aditif untuk mengurangi kadar air pencampur dan atau mengatur waktu pengikatan yang memenuhi syarat ASTM C 494, bila digunakan dengan atau tanpa campuran bahan tambahan kimia lainnya, akan banyak mengurangi jumlah air per satuan isi beton. Penggunaan sedikit bahan tambahan kimiak, untuk *slump* yang sama, akan memperbaiki sifat beton seperti sifat pengerjaannya, penyelesaian akhir (*finishing*), pemompaan, keawetan, dan kuat tekan serta kuat lenturnya (Badan Standardisasi Nasional, 2012).

1.15 Kerangka pikir

Pada penelitian ini adapun alur dari kerangka pikir dapat dilihat pada **Gambar 1.14**



Gambar 1.14. Kerangka pikir peneliti

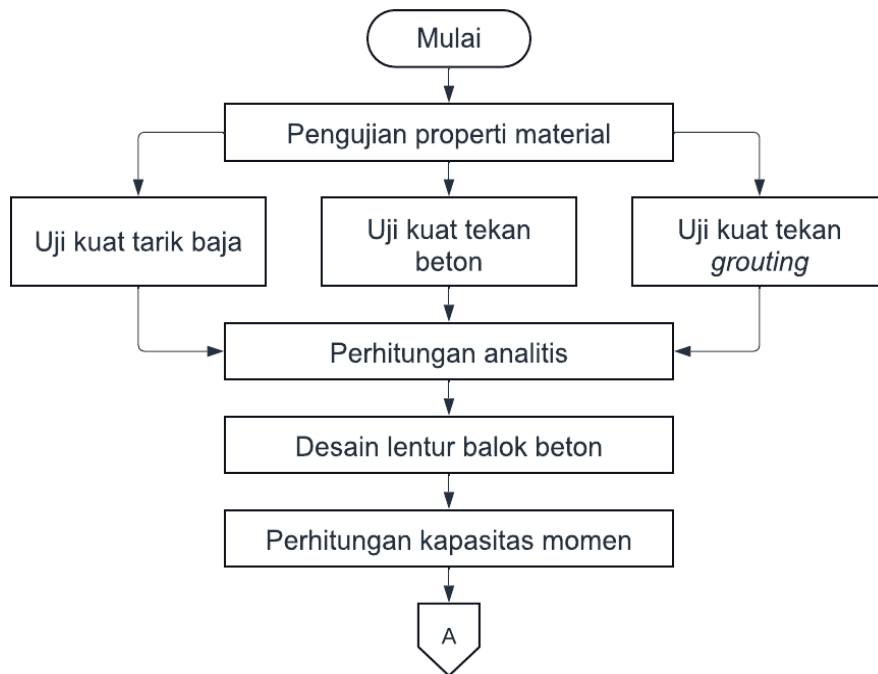
BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan waktu penelitian

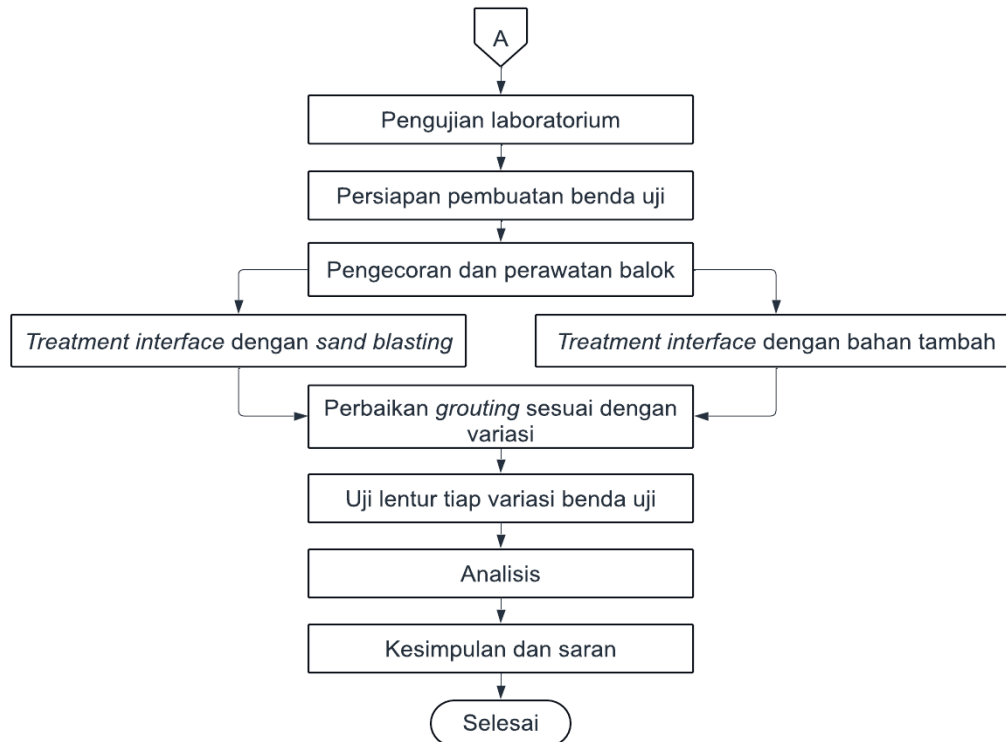
Penelitian ini dilakukan di laboratorium Riset dan Perkuatan Struktur Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Gowa, Universitas Hasanuddin. Sedangkan waktu penyelesaian penelitian ini mulai bulan Juli 2023 – 2024.

2.2 Rancangan penelitian

Karena pengujian dilakukan di laboratorium, maka penelitian ini bersifat eksperimental. Sementara itu, tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi baik balok beton bertulang biasa (tanpa perbaikan) maupun balok beton bertulang yang diperkirakan mengalami pengelupasan dan diperbaiki dengan menggunakan grouting, sandblasting, pembersihan, dan material tambahan. Tiga tahap penelitian adalah: 1) pengujian kualitas bahan; 2) melakukan perhitungan analitis; dan 3) pengujian kapasitas balok beton bertulang. Temuan pengujian dianalisis, dan rekomendasi serta kesimpulan diambil. Berikut adalah alur rancangan penelitian yang ditunjukkan pada **Gambar 2.1** di bawah



Gambar 2.1. Bagan alir penelitian



Gambar 2.1. Lanjutan Bagan alir penelitian

2.3 Perhitungan analitis

Penelitian ini akan melakukan perhitungan analitis untuk mengevaluasi dua aspek spesifik: kapasitas momen dan respon defleksi. Estimasi ini menggunakan metodologi balok yang hanya menerima pembebanan lentur. Dalam perhitungan analisis ini akan fokus pada dua kondisi momen yang disebabkan oleh pembebanan lentur: kondisi retak awal dan kondisi ultimit.

2.3.1 Perhitungan kapasitas momen

Perhitungan kapasitas momen pada balok beton bertulang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$M_n = A_s \times f_s \times (d - 0.5 \times c) \quad (21)$$

Dimana:

M_n = kapasitas momen nominal (kN.m)

A_s = luas penampang baja tulangan tarik (mm²)

f_s = tegangan baja tulangan tarik nominal (MPa)

d = jarak dari sumbu netral ke sisi terjauh penampang (mm)

c = selimut beton ke pusat tulangan terluar (mm)

sedangkan untuk kapasitas momen ultimit dapat ditentukan berdasarkan persamaan dibawah:

$$M_u = 0.9 \times A_s \times f_s \times (d - 0.5 \times c) \quad (22)$$

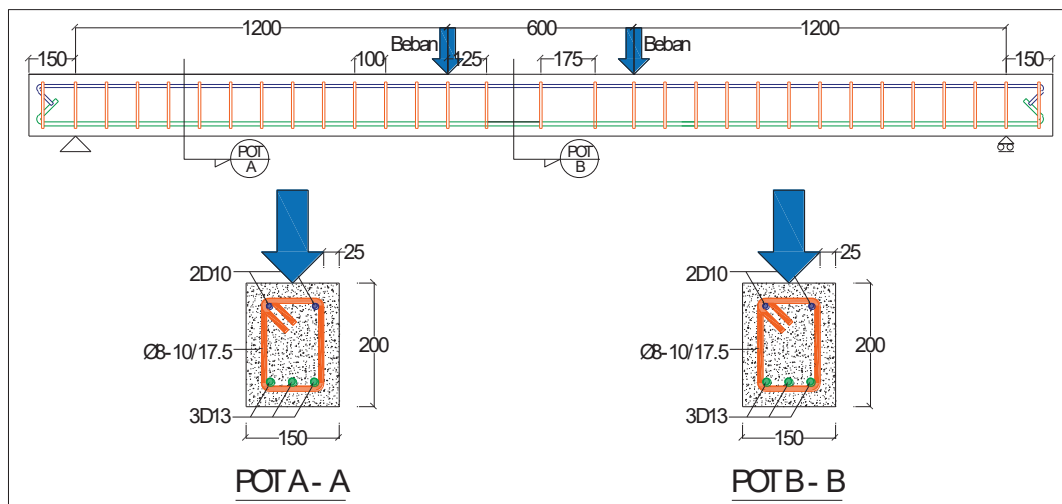
Dimana:

M_u = kapasitas momen ultimit (kN.m)

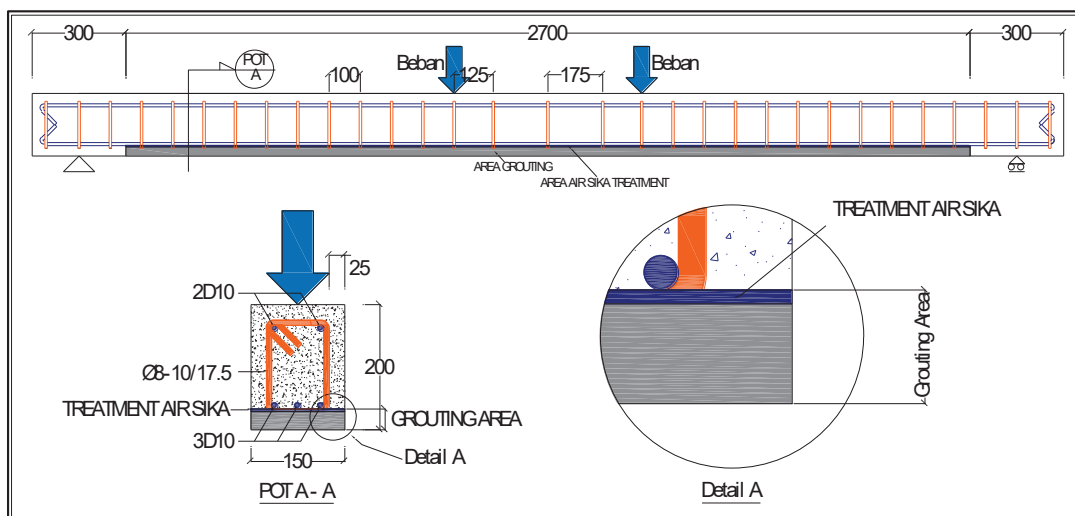
- A_s = luas penampang baja tulangan tarik (mm^2)
 f_s = tegangan baja tulangan tarik nominal (MPa)
 d = jarak dari sumbu netral ke sisi terjauh penampang (mm)
 c = selimut beton ke pusat tulangan terluar (mm)

2.4 Desain benda uji balok

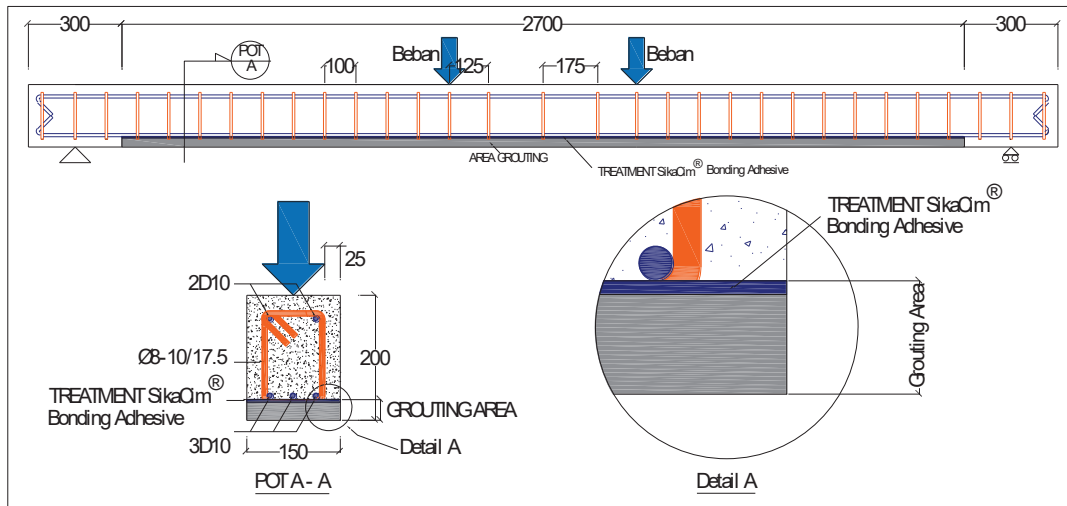
Pendekatan desain kekuatan ultimit digunakan untuk menganalisis ukuran dan tulangan balok. Pengujian balok dilakukan dengan menggunakan instrumen standar yang dirancang khusus untuk pengujian balok. Penelitian ini melibatkan pengujian 4 konfigurasi balok, dengan benda uji berdimensi 150 x 200 x 3300 mm. Setiap iterasi benda uji terdiri dari tiga buah dengan mutu beton f'_c 25 MPa. Untuk memperoleh gambaran visual benda uji beserta ciri-ciri spesifiknya, silakan lihat gambar di bawah ini:



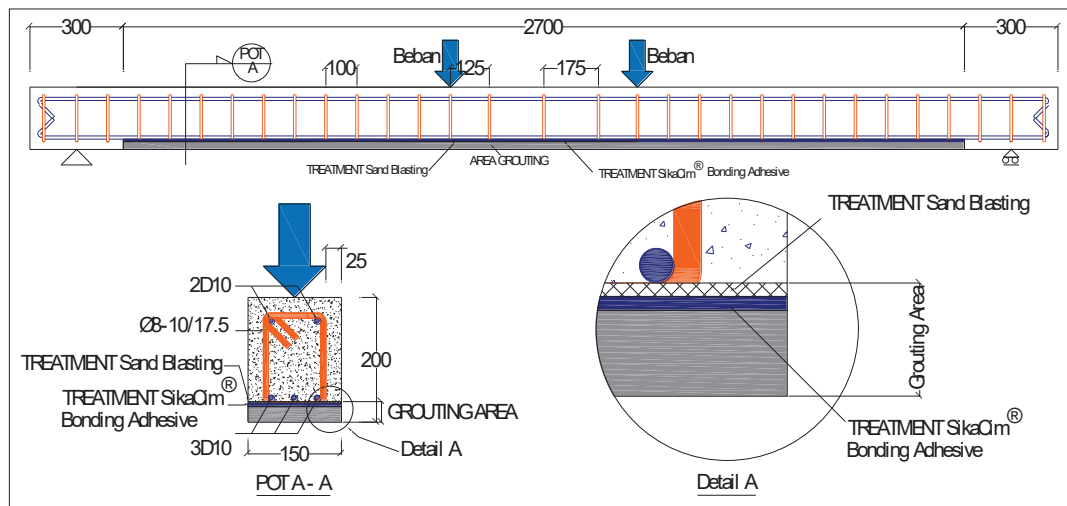
Gambar 2.2. Detail benda uji – BN (Balok Normal)



Gambar 2.3. Detail benda uji – BGA (Balok Grouting Air)

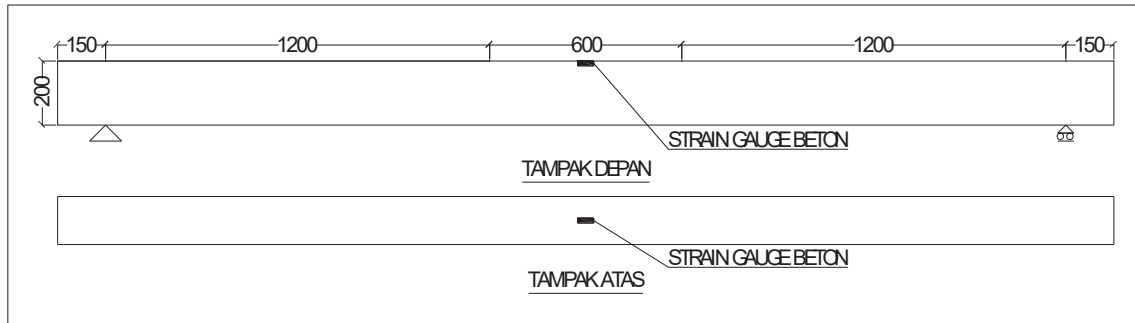


Gambar 2.4. Detail benda uji – BGN (Balok Grouting Normal)

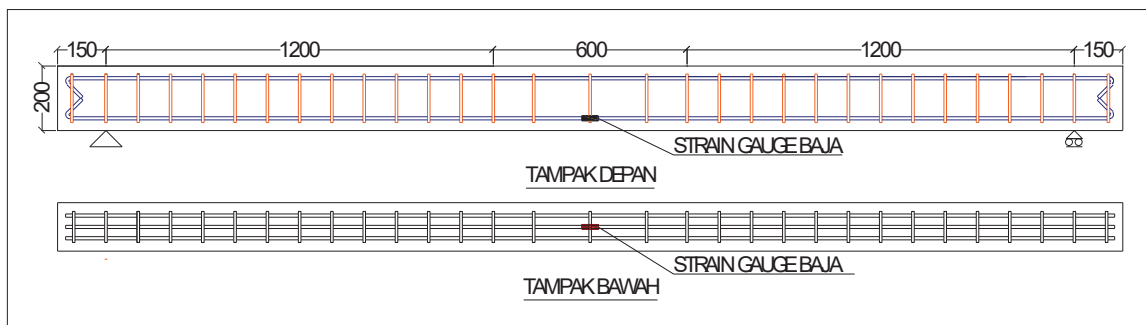


Gambar 2.5. Detail benda uji – BGS (Balok Grouting Sandblasting)

Untuk mengukur regangan (atau deformasi) pada balok, gunakan *Strain Gauge* (SG). Bahan yang digunakan dalam produk ini adalah foil logam, disebut juga kawat logam, yang memiliki kualitas insulasi (atau pengisolasi) dan diaplikasikan pada tikungan yang pada akhirnya akan merusak tekanan. Ide dasarnya adalah jika ada tekanan pada tikungan, foil atau kain akan berubah bentuk dan alat listrik juga akan terdistorsi. Untuk laboratorium pemasangan SG, percobaan akan dilakukan pada beton, baja. Grafik berikut menggambarkan ambang batas *Strain Gauge* (SG):



Gambar 2.6. Titik pemasangan *strain gauge* beton



Gambar 2.7. Titik pemasangan *strain gauge* baja

2.5 Pembuatan benda uji

Pembuatan benda uji terdiri beberapa tahap yaitu 1) penyiapan material, 2) pemasangan instrumentasi pada tulangan, 3) penyiapan bekisting, 4) pengecoran beton, 5) perawatan benda uji sebelum pemberian *surface treatment* 6) pemberian *surface treatment*, 7) pelaksanaan *grouting*, 8) perawatan beton, 9) pemasangan instrumentasi pada beton.

- Tahap 1:** Tulangan benda uji dibuat dengan membuat sengkang dari tulangan baja $\Phi 8$ dan tulangan memanjang menggunakan tulangan D10 dan D13.
- Tahap 2:** Pemasangan *strain gauge* untuk mengukur regangan pada tulangan dilakukan sebelum tulangan dimasukkan ke dalam bekisting.
- Tahap 3:** Bekisting yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari pelat besi. Bekisting dirancang untuk memastikan bahwa balok yang dibentuk sesuai dengan dimensi yang ditentukan dalam rencana. Permukaan bagian dalam bekisting dibersihkan dari serpihan dan dilumasi untuk memudahkan pembongkaran dan memberikan permukaan yang halus pada balok beton.
- Tahap 4:** Setelah *strain gauge* dipasang pada tulangan, rangkaian tulangan ditempatkan ke dalam cetakan/bekisting dan dilengkapi *spacer* untuk membuat lapisan beton pada balok. Proses pengecoran dilanjutkan dengan memanfaatkan beton ready mix dengan kuat tekan yang diinginkan sebesar 25 MPa.

- Tahap 5:** Perawatan balok dilakukan pada saat beton sedang dalam proses pengerasan. Perawatan beton dilakukan dengan cara membasahi permukaan beton dengan karung goni selama 28 hari. Prosedur serupa juga digunakan pada sampel uji sifat (dengan diameter silinder 100 mm dan tinggi 200 mm) untuk menjelaskan sifat mekanik beton pada balok beton bertulang.
- Tahap 6:** Setelah balok beton bertulang mengeras sepenuhnya setelah 28 hari, benda uji menjalani perawatan permukaan sesuai modifikasi yang dimaksudkan, yang meliputi peledakan pasir dan penerapan bahan pengikat sebagai bahan tambahan.
- Tahap 7:** Setelah benda uji telah mendapatkan *surface treatment*, langsung dilakukan perbaikan dengan metode *grouting*
- Tahap 8:** Benda-benda yang telah menjalani perawatan permukaan dan restorasi harus menjalani proses perawatan tambahan, yang meliputi *curing* dengan karung goni yang telah dirawat dan penempatannya di area yang baru saja dipasang *grouting*.
- Tahap 9:** Pasang pengukur regangan beton ke permukaan beton di titik tengah. Sebelum memasang *strain gauge*, permukaan beton dihaluskan dengan amplas dan dibersihkan dari debu menggunakan larutan aseton. Selanjutnya benda uji disiapkan untuk memulai tahap pengujian.

2.6 Surface treatment sand blasting

Dalam kasus tertentu, perlakuan sand blasting dilakukan untuk menghilangkan korosi pada tulangan baja yang terekspos akibat spalling dan memulihkan lapisan pasif yang rusak akibat korosi. Melalui analisis komprehensif terhadap literatur yang tersedia, diharapkan penerapan perlakuan sand blasting dapat secara efektif meningkatkan daya rekat antara beton yang sudah ada dan material *grouting* yang baru diterapkan. Skema proses peledakan pasir digambarkan pada gambar terlampir:



Gambar 2.8. Proses *sand blasting* di luar laboratorium



Gambar 2.9. Close up pengerjaan *sand blasting* pada benda uji

2.7 Perlakuan surface treatment dengan bonding agent

Perawatan ini memerlukan penggunaan SikaCim® Bonding Adhesive, yaitu bahan tambahan yang digunakan pada saat *pre-grouting* dan dicampur sesuai dengan anjuran penggunaan. Penggunaan bahan tambahan dalam penelitian ini diharapkan dapat memperkuat hubungan antara beton lama dan area yang baru dipasang *grouting*. Selain itu, penelitian ini dapat membandingkan berbagai perawatan permukaan dan menentukan mana yang paling efektif untuk memperbaiki beton yang retak.



Gambar 2.10. Proses pemberian *surface treatment* pada benda uji

2.8 Uji dan perbaikan dengan *grouting*

Semen *grouting* siap pakai harus memenuhi standar ASTM C-1107 dan *Corps of Engineering* CDR C-621 dan tidak menyusut diperlukan untuk pekerjaan *grouting* ini. Semen *grouting* ini, Sika Grout-215, dirancang untuk bekerja di lingkungan laboratorium. Tidak menyusut, memiliki masa kerja yang sesuai dengan suhu setempat, mengalir dengan baik, dan memenuhi persyaratan ASTM C-1107 dan *Corps of Engineers* CRD C-621. Proses *grouting* harus memperhatikan hal-hal berikut:

- 1) Sebaiknya tuangkan pasta *grouting* dari satu tempat, jika memungkinkan.
- 2) Jika luas permukaannya cukup luas, tuangkan cairan dari tengah hamparan tersebut.
- 3) Ketika penuangan diperlukan dari banyak lokasi, penting untuk mencegah penggabungan aliran pasta *grouting* yang tidak terkendali atau tidak terlihat, untuk menghasilkan pencampuran aliran yang mulus.
- 4) Tuang adonan pasta secara merata untuk mencegah terbentuknya gelembung udara.
- 5) Proses penuangan harus dilakukan secara terus menerus dan tidak terputus-putus, dengan memperhatikan kecepatan penuangan dan pencampuran pasta *grouting* secara cermat.
- 6) Jangan menggunakan *concrete vibrator* untuk getaran.
- 7) Keseluruhan prosedur penuangan dan pengaliran harus diselesaikan dalam jangka waktu 25 menit setelah penggabungan bahan pasta *grouting*.
- 8) Suhu kombinasi harus dikontrol selama penerapan dan hingga 48 jam setelah penuangan untuk memastikan tidak melebihi 30°C.

Apabila perbaikan dilakukan dengan cara *grouting* pada benda uji, maka diambil sedikit bahan perbaikan untuk menguji bahan *grouting* tersebut. Pengujian yang dilakukan sama dengan pengujian kuat tekan beton untuk mendapatkan sifat mekanik beton.



Gambar 2.11. Pembuatan pasta *grouting*: (a) bahan dan alat *grouting* (b) pencampuran bahan *grouting*

2.9 Pengujian properti material

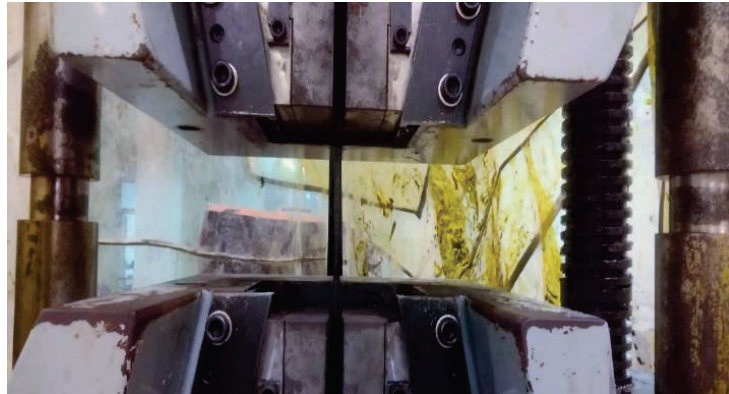
Pengujian sifat material dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik material yang diperiksa. Sifat mekanik tulangan seperti tegangan leleh, tegangan tarik ultimit, dan modulus elastisitas ditentukan melalui analisis hasil uji tarik. Sifat mekanik tulangan baja yang digunakan pada konstruksi beton bertulang dinilai berdasarkan standar SNI 2052:2017 dan Metode Uji Tulangan Baja SNI 07-0371. Kuat tekan beton ditentukan dengan melakukan pengujian sesuai standar SNI 1974:2011. Demikian pula kuat lentur beton ditentukan dengan melakukan pengujian sesuai standar SNI 4431:2011, dan kuat tarik beton ditentukan dengan melakukan pengujian sesuai standar SNI 2491:2014. Bahan tulangan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari baja tulangan D13, D10 dan Ø8. Material beton yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari batching plant dengan kekuatan minimal yang diinginkan sebesar 25 MPa.

2.9.1 Pengujian kuat tarik baja

Baja yang cacat boleh digunakan sepanjang memenuhi persyaratan baja tulangan polos dan sirip sebagaimana tercantum dalam SNI 2052:2017:

1. tanpa cacat permukaan;
2. Tegangan luluh (f_y) baja tulangan sirip antara 420 sampai 545 MPa, tegangan putus (f_u) minimal 525 MPa, dan regangan minimal 14%;
3. Untuk baja tulangan polos, regangannya minimal 11%, tegangan luluh (f_y) antara 280 dan 405 MPa, dan tegangan putus (f_u) minimal 350 MPa.

Strain gauge tipe FLAB-2-11-5LJC-F (faktor pengukur $2,12 \pm 1\%$) dan *CN adhesive* digunakan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.12.**, dipakai sebagai pengukur regangan baja dalam penelitian ini. Untuk menguji baja, sirip batang dibersihkan dengan pembersih baja, diukur panjang awal material, lalu baja ditempatkan pada pegangan *Universal Testing Machine (UTM)*, dan diberi beban untuk mengukur tegangan dan regangan.



Gambar 2.12. Pengujian kuat tarik tulangan

2.9.2 Pengujian bahan beton

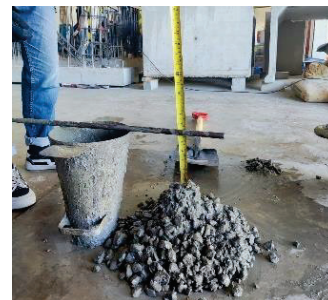
Penelitian ini menggunakan beton segar *ready mix* yang disiapkan di *Batching Plant* dan dipindahkan ke lokasi pengecoran dengan truk pengaduk. Persyaratan yang ditentukan dalam SNI 2847:2019 mengamanatkan nilai slump nominal tidak boleh melebihi 100 mm dan kuat tekan beton minimal 25 MPa. Material yang digunakan terdiri dari batu pecah dengan ukuran agregat maksimal 20 mm. Terdiri dari 34,35% pasir dan 65,65% batu pecah. Ketentuan ini ditentukan berdasarkan hasil desain komposisi campuran tertentu, sesuai dengan parameter yang ditentukan dalam SNI 2847:2019.

1) Uji *slump*

Uji *slump* beton dilakukan untuk mengetahui konsistensi campuran beton yang akan dibuat. Uji *slump* beton adalah prosedur langsung yang digunakan untuk menilai viskositas campuran. Menurut standar SNI 4433-2016, slump mengacu pada ukuran viskositas, plastisitas, dan kohesivitas beton segar yang dicampur. Uji *slump* beton bertujuan untuk memastikan bahwa beton yang diproduksi di *batching plant* sesuai dengan rencana konstruksi suatu bangunan. Keadaan khusus untuk melakukan uji *slump* yang diinginkan digambarkan pada **Gambar 2.13**.



(a)

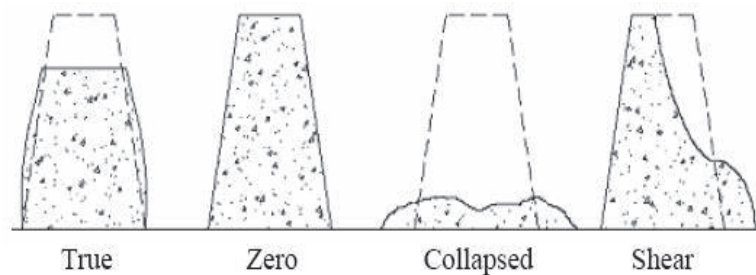


(b)

Gambar 2.13. Uji *slump* beton (a) memasukkan benda uji, (b) pengukuran nilai *slump*

Adapun hasil uji *slump* beton mengalami 4 kondisi, seperti terlihat pada **Gambar 2.14.** yaitu:

- *True slump* – *true slump* adalah satu-satunya jenis *slump* yang dapat diukur selama pengujian. Pengukurannya diperoleh dengan mengukur jarak dari puncak kerucut ke permukaan atas beton setelah kerucut dilepas.
- *Zero slump* – *zero slump* menunjukkan rasio air-semen yang sangat rendah, sehingga menghasilkan campuran kering. Konstruksi jalan biasanya menggunakan jenis beton ini.
- *Collapsed slump* – hal ini terjadi jika rasio air-semen terlalu tinggi, seperti ketika campuran beton terlalu basah atau campuran *workability* yang tinggi, sehingga uji *slump* tidak sesuai.
- *Shear slump* – *shear slump* menandakan bahwa temuan tersebut tidak dapat disimpulkan, sehingga memerlukan pengujian ulang terhadap beton.



Gambar 2.14. Jenis hasil uji *slump* beton

2) Uji kadar udara

Kekuatan, daya tahan, dan kualitas beton lainnya sangat dipengaruhi oleh kandungan udaranya. Pengujian kadar udara dilakukan untuk memastikan beton akhir memenuhi persyaratan. Alat yang digunakan pada pengujian ini adalah *air meter*, dan dapat dilakukan dengan mengacu pada SNI 1973:2016 metode uji densitas, volume produksi campuran dan kadar udara (gravimetrik) beton. Penentuan kadar udara dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\text{Kadar udara (\%)} = \left(\frac{\text{Volume udara}}{\text{Volume beton}} \right) \times 100\% \quad (23)$$

Setelah mendapatkan kadar udara dapat dilakukan pemeriksaan apakah kandungan udara yang diukur memenuhi persyaratan yang diberikan. Komponen udara pada beton yang baik biasanya berkisar antara 1,5% hingga 4,5%. Kadar udara yang terlalu tinggi dapat melemahkan beton, sedangkan kadar udara yang terlalu rendah dapat membuat beton menjadi rapuh dan mudah retak.



(a)



(b)

Gambar 2.15. Pemeriksaan kadar udara dengan *air meter*: (a) pengerjaan uji kadar udara di laboratorium, (b) *close up air meter*

3) Uji kuat tekan beton

Kuat tekan beton (f'_c) mengacu pada jumlah gaya maksimum per satuan luas yang dapat diterapkan pada benda uji beton sebelum beton tersebut runtuh. Sesuai persyaratan yang dituangkan dalam SNI 1974:2011, kuat tekan beton ditentukan melalui:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (24)$$

Dimana:

P = gaya aksial (N)

A = luas penampang melintang silinder (mm^2)

Faktor koreksi untuk mengubah kuat tekan nominal dari 15 MPa menjadi 45 MPa ditentukan oleh perbandingan panjang (L) terhadap diameter (D) benda uji. Mengenai modulus elastisitas beton, menurut pasal 8.5.1 SNI 2847:2013, terdapat hubungan antara modulus elastisitas beton (E_c), kuat tekan (f'_c), dan berat jenis beton normal. Korelasi ini dapat ditentukan dengan menggunakan **Persamaan 19**. Kuat tekan beton f'_c dengan menggunakan persamaan diatas dikalikan dengan faktor koreksi yang diperoleh dari perbandingan ukuran benda uji silinder dimana, panjang benda uji L = 200 mm dan diameter benda uji D = 100 mm atau L/D = 2 maka, berdasarkan SNI 1974:2011 faktor koreksi diambil sama dengan 1.



Gambar 2.16. Pengujian kuat tekan beton

2.10 Pengujian balok

Uji eksperimental dilakukan untuk mengetahui kuat lentur dan kinerja balok beton bertulang setelah pengelupasan. Pengujian tersebut meliputi perbaikan balok menggunakan metode grouting dan perawatan antarmuka dengan peledakan pasir dan bahan tambahan. Pengujian ini menggunakan metode pembebanan dua titik untuk mengetahui kondisi batas keruntuhan pada lentur. Pengujian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Tahap beton tanpa retak
2. Tahap beton mulai retak – tegangan elastis
3. Tahap tegangan ultimit

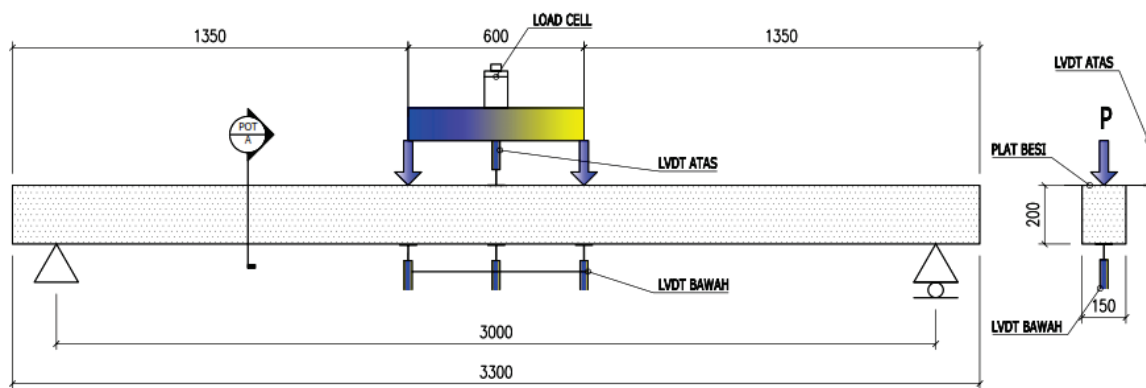
Variabel benda uji dikategorikan menjadi empat jenis yaitu: 1) balok beton bertulang *pra-spalling*, 2) balok beton bertulang dengan perbaikan grouting namun tanpa perlakuan antarmuka, 3) balok beton bertulang dengan perbaikan grouting dan perawatan *Antarmuka* berupa penggunaan SikaCim® Bonding Adhesive, dan 4) balok beton dalam kondisi yang telah dipulihkan melalui penerapan perawatan grouting dan antarmuka, yang melibatkan peledakan pasir dan penggunaan SikaCim® Bonding Adhesive. Tulangan yang digunakan pada benda uji nomor 1 yang tidak mempunyai daerah grouting terdiri dari sengkang vertikal diameter 8 mm dan tulangan memanjang pada sisi tekan dengan menggunakan ulir diameter 10 mm dan ulir diameter 13 mm pada sisi tarik. Dalam spesimen no. 2, 3, & 4 yang mempunyai batas area grouting, dimensi sengkang dan tulangan longitudinal yang digunakan pada sisi tekan seperti pada variasi No. 1. Namun pada sisi tarik, digunakan ulir berdiameter 10 mm dengan asumsi balok dalam keadaan pasca *spalling*. Beton yang digunakan pada semua benda uji memiliki kuat tekan 25 MPa, ditentukan berdasarkan pengujian silinder yang dilakukan setelah umur 28 hari.

2.10.1 Uji lentur statik monotonik

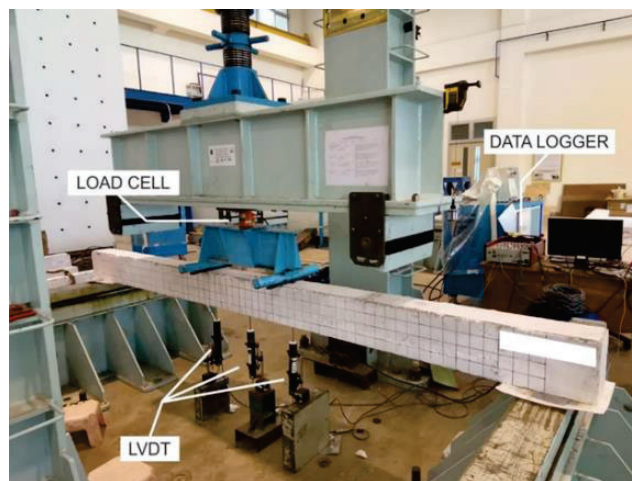
Tata cara pengujian yang dilakukan pada pengujian ini sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan pada balok beton bertulang yang mempunyai panjang bentang 3300 mm dan penampang persegi panjang berukuran 150 x 200 mm.

2. Sampel yang berumur lebih dari 28 hari digunakan untuk uji lentur pada balok beton bertulang. Dua balok beton bertulang normal, dua balok beton bertulang dengan perbaikan grouting tetapi tanpa perawatan antarmuka, dua balok beton bertulang dengan perbaikan grouting dan sandblasting sebagai perawatan antarmuka, dan dua balok beton yang direstorasi menjadi benda uji ini. dengan menggunakan SikaCim® Bonding Adhesive dan sandblasting bersamaan dengan perawatan grouting dan antarmuka
3. Konfigurasi pengujian digambarkan pada **Gambar 2.17**, dimana item pengujian dimuat hingga gagal.
4. Kapasitas menahan beban balok beton bertulang, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.18.**, diuji. Pengujian balok dilakukan dengan menggunakan pembacaan sel beban. Setiap beban adalah satu kilonewton. Tiga LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) dipasang di bagian bawah balok untuk mencatat defleksi yang terjadi di dalamnya.
5. Pengujian ini membahas hubungan antara beban dan lendutan dan hubungan antara beban dan regangan.



Gambar 2.17. Setup benda uji



Gambar 2.18. Posisi setup benda uji pada frame uji

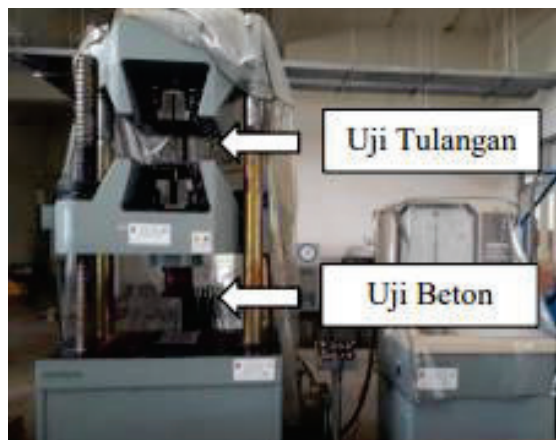
2.11 Alat dan bahan penelitian

2.11.1 Peralatan yang digunakan pada penelitian

1. Alat ukur regangan baja tulangan
Pada tulangan longitudinal bawah dipasang *strain gauge* tipe FLKB-2-11-5LJC-F (*gauge factor* $2,12 \pm 1\%$), ditempatkan pada tengah bentang (momen maksimum). Perekat yang digunakan untuk merekatkan *strain gauge* pada permukaan tulangan adalah CN Adhesive.
2. Alat ukur regangan beton
Alat ukur regangan beton adalah *strain gauge* tipe PL-60-11-5LJC-F (*gauge factor* $2,13 \pm 1\%$), yang dilekatkan pada permukaan atas benda uji, daerah $\frac{1}{2}$ tinggi benda uji, serta pada daerah $\frac{1}{4}$ tinggi benda uji. Perekat yang digunakan untuk merekatkan *strain gauge* pada permukaan beton adalah CN-E Adhesive.
3. Alat ukur lendutan
Alat yang digunakan untuk mengukur besar dan arah lendutan yang terjadi pada benda uji selama pembebanan adalah LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) kapasitas 50 mm, dengan ketelitian 0,01mm.
4. Alat uji pembebanan
Benda uji yang akan dibebani diletakkan pada *static loading frame* dengan kapasitas 1500 kN di atas benda uji di tengah bentang diletakkan seperangkat alat pembebanan, serta *load cell* kapasitas 200 kN untuk mengetahui besar beban yang diberikan dan dihubungkan dengan *data logger*, untuk merekam secara otomatis data yang diukur oleh *strain gauge*, LVDT.
5. Alat pendukung pengujian
 - a. Universal Testing Machine kapasitas 100 Ton untuk uji tekan, tarik belah, modulus elastisitas dan uji lentur.
 - b. Mesin Pencampur bahan beton kapasitas 0.2 m³ (mixer)
 - c. Cetakan balok ukuran 15 cm x 20 cm x 330 cm
 - d. Alat slump test
 - e. Air meter
6. Alat *sand blasting*
Proses *sand blasting* pada penelitian ini menggunakan wipro sand blasting Tank (38L) SB-38-(26-3160-038) yang terhubung airman PDS-185S-6C2 dengan *hose*. Pelaksanaan pada kegiatan ini menggunakan seperangkat APD untuk menghindari hal-hal berbahaya



Gambar 2.19. *Static loading frames*



Gambar 2.20. Universal Testing Machine



Gambar 2.21. Bekisting 15 cm x 20 cm x 330 cm



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2.23. Seperangkat alat *sand blasting*, a) *Sand blasting tank*, b) hose, c) *compressor airman*, d) APD

2.11.2 Bahan yang digunakan pada penelitian

1. Beton segar dari *ready mix*
2. Semen *grouting* yang digunakan Sika Grout 215 (new) kemasan 25 kg/zak
3. Pasir kuarsa
4. SikaCim® Bonding Adhesive



(a)



(b)

Gambar 2.28. a) Semen, b) pasir kuarsa



(a)



(b)

Gambar 2.29. Produk sika, a) Sika Grout 215 (new), b) SikaCim® Bonding Adhesive