

SKRIPSI

**PERILAKU LENTUR BALOK BETON PERBAIKAN
MENGUNAKAN *GROUTING* PADA SELIMUT BETON
DENGAN PERKUATAN *WIREMESH***

Disusun dan diajukan oleh:

**MUH. FARHAN MUHLIS
D011 20 1060**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PERILAKU LENTUR BALOK BETON PERBAIKAN MENGUNAKAN *GROUTING* PADA SELIMUT BETON DENGAN PERKUATAN *WIREMESH*

Disusun dan diajukan oleh

MUH. FARHAN MUHLIS
D011 20 1060

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 24 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Eng. Rudy Zulfaniluddin, ST, M.Eng
NIP: 197011081994121001

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Fakrudin, ST, M.Eng
NIP: 198702282019031005

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Muh. Farhan Muhlis
NIM : D011201060
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Perilaku Lentur Balok Beton Perbaikan menggunakan *Grouting* pada Selimut Beton dengan Perkuatan *Wiremesh*}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 24 Juli 2024

Menyatakan



Muh. Farhan Muhlis

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, atas segala kebaikan dan karunia-Nya kepada setiap insan intelektual, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tak lupa sholawat serta salam kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW sebaik-baiknya suri tauladan. Penyusunan tugas akhir yang berjudul “**PERILAKU LENTUR BALOK BETON PERBAIKAN MENGGUNAKAN *GROUTING* PADA SELIMUT BETON DENGAN PERKUATAN *WIREMESH***” merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak hanya dari penulis sendiri melainkan berkat ilmu, arahan, bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. H. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.,IPM** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.,** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT.** selaku Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. **Bapak Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng.,** selaku dosen pembimbing I dan **Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.,** selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
5. **Bapak Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.

6. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Muhlis, S.Pd., M.Pd.** dan ibunda **Sulastri** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis setiap waktu.
2. **Diba** sebagai saudara tercinta dan teman seumur hidup yang selalu memberikan tunjangan serta dukungannya dalam hidup penulis.
3. Saudari **Nindya Ade Reski** sebagai *inshaallah* pasangan hidup yang telah memberikan semangat, bantuan, dan masukan selama perkuliahan.
4. **Kak Nyjinsco Kaleb Joesila S. R., ST., Kak Khaerunnisa, ST., Marcelino Putra Gareso,** dan **Al-Muktasim Billah** selaku rekan TA yang senantiasa memberikan masukan dan semangat dalam penyelesaian tugas akhir.
5. **Datri, Fanny, Krisna, Afdhal, Oji, Faje, Marcel, Cakra, dan Agung** sebagai teman seperjuangan sedari awal kuliah yang selalu menghibur, memberikan warna yang indah dan selalu memberikan dorongan dan bantuang selama perkuliahan.
6. **Vito, Edo, Eki, Ilham, Irfan, Fadhil, Mansyar, Adam, Alya, Salsa, Yusriyyah, Tiara, dan Thoha** sebagai teman bertukar pikiran sedari awal perkuliahan dan turut mewarnai masa perkuliahan penulis.
7. Saudara-saudari **KKNT-UH GEL. 111 DESA SAPANANG** yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir.

8. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Rekayasa Perkuatan Struktur** yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir.
9. Saudara-saudari **ENTITAS 2021**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2020** yang senantiasa memberikan warna serta pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhirnya semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan kebaikan dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 24 Juli 2024

Penulis

ABSTRAK

MUH. FARHAN MUHLIS. *Perilaku Lentur Balok Beton Perbaikan Menggunakan Grouting Pada Selimut Beton Dengan Perkuatan Wiremesh (dibimbing oleh Rudy Djamaluddin dan Fakhruddin)*

Seiring bertambahnya umur dan temperatur, elemen-elemen yang ada pada struktur dapat mengalami penurunan kualitas yang dapat disebabkan oleh beberapa aspek yang salah satunya adalah akibat pengaruh lingkungan yang menyebabkan terjadinya korosi. Korosi pada struktur dapat mengakibatkan pengelupasan selimut beton atau *spalling* yang jika dibiarkan terlalu lama akan berdampak penurunan kualitas struktur secara keseluruhan sehingga akan dibutuhkan penanganan baik dengan metode perbaikan maupun perkuatan struktur. *Grouting* menjadi salah satu solusi yang paling sering digunakan untuk mengatasi masalah *spalling* karena memiliki kualitas yang hampir menyerupai performa beton pada umumnya. Beberapa penelitian terdahulu telah mencoba menggabungkan material *grouting* dengan material perkuatan lain agar dapat menghasilkan performa material perbaikan sekaligus mampu menjadi material perkuatan pada balok namun hal ini dinyatakan mengalami kegagalan. Untuk menutupi kekurangan tersebut dibutuhkan baja tulangan tambahan dengan *wiremesh* untuk memungkinkan adanya peningkatan kinerja ikatan dan durabilitas elemen struktur secara keseluruhan. Penelitian ini akan melihat efek penggunaan *wiremesh* pada beton perbaikan (*grouting*) dengan tujuan menganalisis perilaku lenturnya balok dengan melihat pola retak dan mode kegagalan pada balok. Perilaku lentur didiskusikan berdasarkan perilaku beban-lendutan, beban maksimum, beban-regangan baja dan beban-regangan beton. Tahapan penelitian yaitu pengujian lentur balok menggunakan sampel balok 150x200 mm dengan panjang 3300 mm sebanyak 6 buah yang terdiri atas balok kontrol, balok perbaikan *grouting* normal dan balok balok perbaikan *grouting* normal dengan perkuatan *wiremesh* masing-masing sebanyak 2 buah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok dengan perbaikan *grouting* dan penambahan *wiremesh* mampu meningkatkan kapasitas balok yang telah mengalami *spalling* akibat korosi, akan tetapi tidak mampu melampaui kapasitas balok mula-mula. Dari mode kegagalan, balok yang diperkuat dengan perbaikan mortar *grouting* dan perkuatan *wiremesh* mengalami kegagalan lentur.

Kata Kunci: *spalling*, mortar *grouting*, perkuatan *wiremesh*

ABSTRACT

MH. FARHAN MUHLIS. *Flexural Behavior Of Repaired Concrete Beam Using Grouting On Concrete Covers With Wiremesh Reinforcement* (supervised by Rudy Djamaluddin and Fakhruddin)

As age and temperature increase, elements within structures can experience a decrease in quality due to several factors, one of which is environmental influence leading to corrosion. Corrosion in structures can result in the peeling of concrete cover or spalling, which if left unattended for too long, can lead to a decline in the overall structural quality, necessitating intervention either through repair methods or structural reinforcement. Grouting is one of the most commonly used solutions to address spalling issues because it exhibits qualities closely resembling typical concrete performance. Previous studies have attempted to combine grouting materials with other reinforcement materials to produce repair material performance while also serving as reinforcement for beams, but this has been reported to fail. To address this shortfall, additional reinforcing steel with wire mesh is needed to enhance bonding performance and overall structural element durability. This study will examine the effect of wire mesh usage in repair concrete (grouting) with the aim of analyzing the flexural behavior of beams by observing crack patterns and failure modes in the beams. Flexural behavior is discussed based on load-deflection behavior, maximum load, steel strain-load, and concrete strain-load. The research stages involve flexural testing of beams using 150x200 mm beam samples with a length of 3300 mm, totaling 6 pieces consisting of a control beam, a normal grouting repair beam, and a grouting repair beam with wire mesh reinforcement, each with 2 pieces. The research results indicate that beams with grouting repair and the addition of wire mesh can increase the capacity of beams that have experienced spalling due to corrosion, but they are unable to surpass the capacity of the original beams. Regarding failure modes, beams reinforced with mortar grouting repair and wire mesh reinforcement experience flexural failure.

Keywords: spalling, mortar grouting, wiremesh reinforcement

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang.....	11
2.3 Lendutan Pada Balok	13
2.4 Retak pada Balok Beton Bertulang.....	15
2.5 Mode Keruntuhan Balok Beton Bertulang.....	16
2.6 Kegagalan Balok Beton Bertulang.....	17
2.7 Metode Perbaikan dan Perkuatan.....	18
2.8 Mortar <i>Grouting</i>	19
2.9 <i>Wiremesh</i>	20
2.10 Teori Lekatan Beton Lama dan Beton Baru	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1 Bagan Alir Penelitian	24
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	25
3.3 Bahan dan Alat.....	25
3.3.1 Bahan.....	25
3.3.2 Alat	26
3.4 Pengujian Material	29
3.4.1 Pengujian Karakteristik Tulangan	29
3.4.2 Pengujian Kuat Tekan Beton.....	29
3.4.3 Pengujian Kuat Lentur Beton	30
3.4.4 Pengujian Kuat Tekan Mortar <i>Grouting</i>	31

3.4.5 Pengujian Lentur Mortar <i>Grouting</i>	31
3.4.6 Pengujian Lentur Balok.....	32
3.5 Tahapan Penelitian.....	34
3.5.1 Pabrikasi Benda Uji Balok Beton Bertulang.....	34
3.5.2 Pemasangan <i>Wiremesh</i>	35
3.5.3 Perbaikan dengan <i>Grouting</i>	36
3.5.4 Pengujian Lentur Balok.....	38
3.6 Kapasitas Teoritis.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Pengujian Tarik Baja Tulangan.....	41
4.2 Pengujian Kuat Tekan Beton.....	41
4.3 Pengujian Kuat Lentur Beton.....	42
4.4 Pengujian Kuat Tekan Mortar <i>Grouting</i>	43
4.5 Pengujian Kuat Lentur Mortar <i>Grouting</i>	45
4.6 Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang.....	46
4.6.1 Hubungan Beban dan Lendutan.....	46
4.6.2 Beban Maksimum.....	50
4.6.3 Perbandingan Analisa Teoritis dan Hasil Pengujian.....	51
4.6.4 Hubungan Beban dan Regangan Baja.....	53
4.6.5 Hubungan Beban dan Regangan Beton.....	54
4.7 Pola Retak dan Mode Kegagalan.....	55
4.7.1 Pola Retak dan Mode Kegagalan pada Balok BK.....	55
4.7.2 Pola Retak dan Mode Kegagalan pada Balok BGN.....	57
4.7.3 Pola Retak dan Mode Kegagalan pada Balok BGN-R.....	59
4.8 Analisis dengan Menggunakan <i>Finite Element Method</i>	62
4.8.1 Hasil Analisis <i>Finite Element Method</i> (FEM).....	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA.....	71
LAMPIRAN.....	74

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Karakteristik <i>Sika Grout 215</i>	20
Tabel 2. Komposisi bahan campuran beton per m ³	30
Tabel 3. Variasi Benda Uji	32
Tabel 4. Rekapitulasi nilai beban-lendutan teoritis	40
Tabel 5. Hasil uji kuat tarik tulangan baja.....	41
Tabel 6. Hasil pengujian kuat tekan beton	42
Tabel 7. Hasil uji kuat lentur beton	43
Tabel 8. Hasil uji kuat tekan mortar <i>grouting</i>	44
Tabel 9. Hasil uji kuat lentur mortar <i>grouting</i>	45
Tabel 10. Rekapitulasi nilai beban – lendutan.....	48
Tabel 11. Perbandingan kapasitas beban dan momen berdasarkan analisis dengan rata-rata hasil pengujian	52
Tabel 12. Rekapitulasi nilai beban – regangan baja.....	54
Tabel 13. Rekapitulasi nilai beban – regangan beton.....	55
Tabel 14. Tabel perbandingan hasil pengujian dan hasil FEM	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Spalling</i> pada beton akibat korosi.....	2
Gambar 2. Kegagalan benda uji pada balok beton dengan angkur pada <i>wiremesh</i>	7
Gambar 3. Mode kegagalan balok benda uji	9
Gambar 4. Persiapan benda uji balok SRG	10
Gambar 5. Kegagalan benda uji balok SRG.....	10
Gambar 6. Diagram regangan dan tegangan balok beton bertulang dengan kondisi seimbang.....	12
Gambar 7. Grafik hubungan tegangan-regangan kondisi plastis.....	12
Gambar 8. Hubungan beban – lendutan pada balok.....	13
Gambar 9. Faktor pengali untuk lendutan jangka panjang.....	14
Gambar 10. Jenis Retakan pada Beton	16
Gambar 11. <i>Wiremesh</i>	21
Gambar 12. Gesekan geser	22
Gambar 13. Mekanisme ketahanan geser <i>interface</i>	23
Gambar 14. Diagram alir penelitian	25
Gambar 15. Mortar <i>grouting</i>	26
Gambar 16. Sika <i>bond</i>	26
Gambar 17. <i>Wiremesh</i>	26
Gambar 18. (a) <i>Strain gauge</i> baja (b) <i>CN Adhesive</i>	27
Gambar 19. (a) <i>Strain gauge</i> beton (b) <i>CN-E Adhesive</i>	27
Gambar 20. LVDT (<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>).....	28
Gambar 21. (a) Alat <i>load cell</i> (b) <i>Data Logger</i>	28
Gambar 22. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM)	29
Gambar 23. Benda uji kuat tekan	30
Gambar 24. Dimensi benda uji	31
Gambar 25. Dimensi benda uji kuat tekan	31
Gambar 26. Dimensi benda uji	32
Gambar 27. Benda uji – Balok kontrol (BK).....	32
Gambar 28. Benda uji – Balok <i>grouting</i> normal (BGN)	33
Gambar 29. Benda uji – Balok <i>grouting</i> + <i>Wiremesh</i> (BGN-R)	33
Gambar 30. Pabrikasi benda uji balok.....	35
Gambar 31. Pemasangan <i>wiremesh</i>	36
Gambar 32. Pembuatan mortar <i>grouting</i>	37
Gambar 33. Pengecoran material perbaikan.....	38
Gambar 34. <i>Set-up</i> pengujian lentur balok	38
Gambar 35. Posisi <i>strain gauge</i>	39
Gambar 36. Hubungan beban – lendutan teoritis	39
Gambar 37. Uji kuat tekan beton.....	42
Gambar 38. Uji kuat lentur beton	43
Gambar 39. Uji kuat tekan mortar <i>grouting</i>	44
Gambar 40. Uji kuat lentur mortar <i>grouting</i>	45

Gambar 41. Hubungan beban – lendutan beban uji.....	47
Gambar 42. (a) Balok kontrol (b) Balok dengan perbaikan	48
Gambar 43. Beban maksimum	50
Gambar 44. Hubungan beban – regangan baja.....	53
Gambar 45. Hubungan beban-regangan beton	54
Gambar 46. Pola retak pada balok kontrol (BK)	56
Gambar 47. Kehancuran beton pada sisi tekan balok kontrol (BK).....	56
Gambar 48. Retak vertikal balok BK pada perhitungan kuantifikasi retakan	56
Gambar 49. Pola retak pada balok BGN	57
Gambar 50. Retak awal balok BGN	57
Gambar 51. (a) Munculnya retak vertikal awal (b) Retak vertikal putus menjadi retak horizontal (c) Retak kembali diteruskan secara vertikal ke beton lama.....	58
Gambar 52. Pengukuran lebar retak pada balok BGN	58
Gambar 53. Kegagalan <i>debonding</i> pada balok BGN	58
Gambar 54. Kehancuran sisi tekan	59
Gambar 55. Retak vertikal balok BGN pada perhitungan kuantifikasi retakan ..	59
Gambar 56. Pola retak pada balok BGN-R	59
Gambar 57. Retak awal pada balok BGN-R.....	60
Gambar 58. Pola retak pada balok BGN-R	60
Gambar 59. Pengukuran lebar retak maksimum pada balok BGN-R.....	61
Gambar 60. <i>Debonding</i> pada balok BGN-R.....	61
Gambar 61. Kehancuran sisi tekan pada balok BGN-R.....	61
Gambar 62. Retak vertikal balok BGN-R pada perhitungan kuantifikasi retakan	62
Gambar 63. Kontur tegangan balok kontrol (BK) pada saat beban retak.....	62
Gambar 64. Kontur tegangan balok kontrol (BK) pada saat beban maksimum..	63
Gambar 65. Kontur tegangan balok <i>grouting</i> (BGN) pada saat beban retak	63
Gambar 66. Kontur tegangan balok <i>grouting</i> (BGN) pada saat beban maksimum	63
Gambar 67. Kontur tegangan balok <i>grouting</i> + <i>wiremesh</i> (BGN-R) pada saat beban retak	64
Gambar 68. Kontur tegangan balok <i>grouting</i> + <i>wiremesh</i> (BGN-R) pada saat beban maksimum	64
Gambar 69. Perbandingan FEM dan eksperimental pada grafik P- Δ	65
Gambar 70. Perbandingan FEM dan eksperimental pada grafik P- ϵ_{baja}	66
Gambar 71. Perbandingan FEM dan eksperimental pada grafik P- ϵ_{beton}	67

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Kapasitas Lentur Balok Kontrol (BK).....	74
Lampiran 2. Perhitungan Kapasitas Lentur Balok <i>Grouting</i> Normal (BGN)	76
Lampiran 3. Perhitungan Kapasitas Lentur Balok <i>Grouting</i> Normal + <i>Wiremesh</i> (BGN-R).....	78
Lampiran 4. Dokumentasi	81

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
f'_c	Kuat tekan beton eksisting (MPa)
f_r	Modulus keruntuhan / Kuat lentur beton (MPa)
E_s	Modulus elastisitas baja (MPa)
ε_y	Regangan leleh baja
ε_c	Regangan beton
J_d	Jarak gaya tekan pada beton ke gaya tarik tulangan <i>transversal</i> (mm)
J_{dw}	Jarak gaya tekan pada beton ke gaya tarik <i>wiremesh</i> (mm)
M_n	Momen nominal (kN.m)
C_c	Gaya tekan pada beton (kN)
C_s	Gaya tekan pada tulangan (kN)
T_s	Jumlah gaya total dari tulangan tarik (kN)
T_{ws}	Jumlah gaya dari <i>wiremesh</i> (kN)
a	Tinggi balok tekan equivalen (mm)
P	Beban (kN)
I_g	Momen inersia gross (mm ⁴)
y	Titik berat beton dari dasar (mm)
h	Tinggi balok (mm)
b	Lebar balok (mm)
c	Jarak tepi luar atas terhadap garis netral (mm)
δ_{cr}	Lendutan pada saat beban retak (mm)
δ_y	Lendutan pada saat beban leleh (mm)
δ_u	Lendutan pada saat beban maksimum (mm)
L	Panjang balok (mm)
f_y	Kuat leleh tulangan longitudinal (MPa)
$f_{y'}$	Kuat leleh tulangan tekan (MPa)

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
d	Jarak serat tekan ke titik berat tulangan tarik (mm)
d'	Jarak serat tekan ke titik berat tulangan tekan (mm)
d_w	Jarak <i>wiremesh</i> ke titik berat tulangan tekan (mm)
f_{ys}	Kuat leleh tulangan transversal (MPa)
f_{yw}	Kuat leleh <i>wiremesh</i> (MPa)
$A_{s'}$	Luas tulangan tekan balok (mm ²)
A_s	Luas tulangan tarik balok (mm ²)
A_{vs}	Luas tulangan transversal (mm ²)
A_{sw}	Luas tulangan <i>wiremesh</i> (mm ²)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang sampai saat ini masih mengejar ketertinggalan agar dapat menyamai peradaban dan kemajuan negara-negara maju di dunia. Salah satu bentuk upaya pemerintah dalam mengejar ketertinggalan tersebut adalah dengan meningkatkan pembangunan infrastruktur baik dalam skala kecil hingga pembangunan infrastruktur dengan taraf nasional. Sebagian besar infrastruktur yang dibangun menggunakan beton sebagai bahan pembentuknya (Indrayani dkk., 2019). Beton masih menjadi pemenang di kalangan bahan material pembentuk infrastruktur karena sifatnya yang cenderung mudah dibentuk, kedap air dan harganya yang relatif terjangkau jika dibandingkan dengan bahan material lainnya.

Suatu infrastruktur terdiri dari berbagai elemen-elemen yang menggunakan material beton seperti kolom, balok, *pile cap* maupun pondasi. Balok beton merupakan salah satu bagian struktur yang sangat penting pada suatu bangunan. Balok beton berfungsi menahan gaya lentur akibat beban yang bekerja di atas lantai lalu kemudian mendistribusikan beban tersebut ke kolom-kolom penopangnya (Helmi, 2009). Oleh karena itu, penggunaan beton sebagai material penyusun dalam infrastruktur bangunan memerlukan adanya pengembangan, baik dari material beton itu sendiri maupun dari segi metode pembuatannya agar diperoleh jenis beton dengan kualitas tinggi yang mampu menahan perubahan bentuk akibat adanya beban kerja.

Seiring bertambahnya umur dan temperatur pada struktur, elemen-elemen yang ada pada struktur dapat mengalami penurunan kualitas yang dapat disebabkan oleh beberapa aspek, seperti peningkatan beban, kesalahan desain, detail yang buruk, korosi tulangan, cacat konstruksi dan bencana alam seperti gempa bumi (Saidi, dkk. 2021). Kerusakan struktur beton juga dapat terjadi akibat pengaruh lingkungan yang sering terjadi. Fenomena ini berasal dari reaksi kimia antara karbon dioksida (CO_2), ferrum (Fe) dan air (H_2O) sehingga membentuk

asam karbonat yang dapat menimbulkan korosi pada baja tulangan. Beton yang terletak pada lingkungan yang korosif dapat membuat beton bertulang mudah mengalami korosi dan membuat selimut beton mengalami pengelupasan atau disebut *spalling*. Apabila *spalling* dibiarkan dalam waktu yang lama hal ini akan berdampak pada penurunan kualitas beton secara keseluruhan sehingga menyebabkan kerusakan. Adanya tuntutan bahwa bangunan yang mengalami kerusakan harus segera difungsikan kembali, maka perlu dilakukan penanganan terhadap kerusakan-kerusakan tersebut, baik dengan metode perbaikan maupun perkuatan struktur (*repairing and strengthening*) (Fakhrudin, 2023).



Gambar 1. *Spalling* pada beton akibat korosi

Spalling yang melebihi selimut beton, dapat digunakan metode *grouting* yaitu metode perbaikan dengan melakukan pengecoran memakai bahan *non-shrink* mortar (Fakhrudin, 2023). *Grouting* atau *grout* semen adalah jenis mortar yang disiapkan dengan bahan dasar berupa material semen anorganik atau organik dan penambahan agregat halus serta beberapa aditif (seperti pengeras, *plasticizer*, ekspansi, dll.) berdasarkan rasio semen-air yang rendah (K.Zhang, dkk. 2016). Material ini telah banyak digunakan sebagai bahan perkuatan karena fluiditas yang baik (tanpa getaran), mikroekspansi, penguatan kekuatan, kekuatan tinggi, dan daya lekat yang baik dengan beton lama, yang dapat mengatasi batasan metode perkuatan tradisional dan memiliki nilai penelitian ilmiah yang signifikan serta prospek aplikasi yang luas (G. Peng, dkk. 2022). Oleh karena itu *grout* semen dapat digunakan untuk memperbaiki dan memperkuat balok yang performanya

menurun, dan dengan efektif dapat mengembalikan atau meningkatkan kapasitas lentur pada balok (G.Peng, dkk. 2021; X.P Hu, dkk. 2020).

Sebelumnya telah banyak dilakukan penelitian dengan bahan material *grouting* sebagai perkuatan pada balok beton bertulang namun pada beberapa penelitian terjadi kegagalan akibat tidak sempurnanya lekatan pada daerah sambungan beton normal dan mortar *grouting* (Andi Safirah, 2021). Adapun penelitian lainnya juga telah dilakukan dengan penambahan *sika grout* pada balok beton bertulang dengan kondisi *spalling* menunjukkan adanya penurunan beban maksimum pada balok sehingga penggunaan *grouting* pada balok yang mengalami kerusakan tidak mampu meningkatkan kapasitas kekuatan beton tetapi hanya berfungsi sebagai perbaikan balok (Sugira, 2023).

Untuk menutupi kekurangan dari performa semen *grout*, dibutuhkan baja tulangan tambahan untuk menambah kapasitas lentur pada perkuatan balok dengan menggunakan material *wiremesh*. Teknologi penggabungan mortar dengan *wiremesh* dengan kapasitas tinggi adalah jenis teknologi perkuatan baru yang dikembangkan pada abad ke-21. Metode perkuatan ini dilakukan dengan penempatan *wiremesh* berkekuatan tinggi di atas balok yang akan diperkuat, kemudian mengangkurnya ke balok menggunakan baut ekspansi untuk memungkinkan adanya kolaborasi antar material dengan lebih baik, dan akhirnya mengaplikasikan mortar *grout* yang permeabel sebagai lapisan pelindung untuk meningkatkan kinerja ikatan keseluruhan dan durabilitas elemen yang diperkuat, dengan lebih baik dalam menghambat perkembangan retak (R. Mao, *et. Al.*, 2017) sehingga dapat menghasilkan kekuatan material dengan ikatan dan durabilitas dan ikatan yang baik dan berkekuatan tinggi (Yan Li, *et.Al.*, 2023).

Berdasarkan latar belakang tersebut maka perlu untuk dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental terkait bagaimana perilaku penambahan *wiremesh* yang dipasangkan pada daerah bagian bawah balok beton bertulang secara horizontal sepanjang bentang balok sebagai material perkuatan pada balok *grouting* beton perbaikan dan penulis tuangkan dalam penelitian yang berjudul **“PERILAKU LENTUR BALOK BETON PERBAIKAN MENGGUNAKAN GROUTING PADA SELIMUT BETON DENGAN PERKUATAN WIREMESH”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur balok beton perbaikan menggunakan metode *grouting* pada selimut beton dengan perkuatan *wiremesh*?
2. Bagaimana pola retak dan mode kegagalan balok beton perbaikan menggunakan metode *grouting* pada selimut beton dengan perkuatan *wiremesh*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis perilaku lentur balok beton perbaikan menggunakan metode *grouting* pada selimut beton dengan perkuatan *wiremesh*.
2. Menganalisis pola retak dan mode kegagalan balok beton perbaikan menggunakan metode *grouting* pada selimut beton dengan perkuatan *wiremesh*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat dijadikan sebagai acuan dalam pemberian informasi yang efektif, efisien dan berkelanjutan.
2. Dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan permasalahan tersebut.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan terhadap benda uji balok beton bertulang eksisting yang diperkuat dengan material *grouting* dan penambahan dynabolt dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm.

2. Mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah ($f'c$) 25 MPa dan tulangan polos diameter 8 mm serta tulangan dan ulir diameter 13 mm dan diameter 10 mm.
3. Material perbaikan dengan menggunakan mortar *grouting* komersial dari pencampuran air dengan Sika Grout 215 (New)
4. Material perkuatan dengan menggunakan *wiremesh* sepanjang 3000 mm dengan menggunakan kawat ram ayam yang dipasang pada area *grouting*.
5. Benda uji dibebani dengan beban dua titik secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 100 ton.

1.6 Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah, sistematika penulisan yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga tugas akhir yang dihasilkan lebih sistematis. Sistematika penulisan penelitian ini dapat diurutkan yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Pokok-pokok bahasan dalam bab ini meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, diuraikan secara sistematis tentang teori, pemikiran, dan hasil penelitian terdahulu yang memiliki hubungan dengan penelitian ini. Bab ini memberikan kerangka dasar mengenai konsep dan teori yang akan digunakan untuk pemecahan masalah.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini yang dituangkan dalam bentuk bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data yang didapatkan dari lapangan maupun dari laboratorium.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijabarkan hasil pengujian yang berisi data penelitian serta analisis perhitungan data yang diperoleh untuk selanjutnya diberi uraian pembahasan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Yan, Li *et. Al.*, (2023) tentang studi perilaku lentur balok beton bertulang (RC) pada kondisi berbeda yakni kawat baja hasil daur ulang industri yang dikombinasikan dengan mortar bermutu tinggi, merakitnya menjadi *wiremesh* untuk menghasilkan jenis perkuatan dengan kuat tarik yang tinggi serta ketahanan retak yang baik dalam struktur bangunan. Penelitian ini dilakukan dengan perkuatan *wiremesh* hasil daur ulang dengan variasi kondisi yang berbeda yaitu menggunakan ukuran ankur yang berbeda dengan tipe dan ukuran *wiremesh* yang juga berbeda-beda.



Gambar 2. Kegagalan benda uji pada balok beton dengan ankur pada *wiremesh*

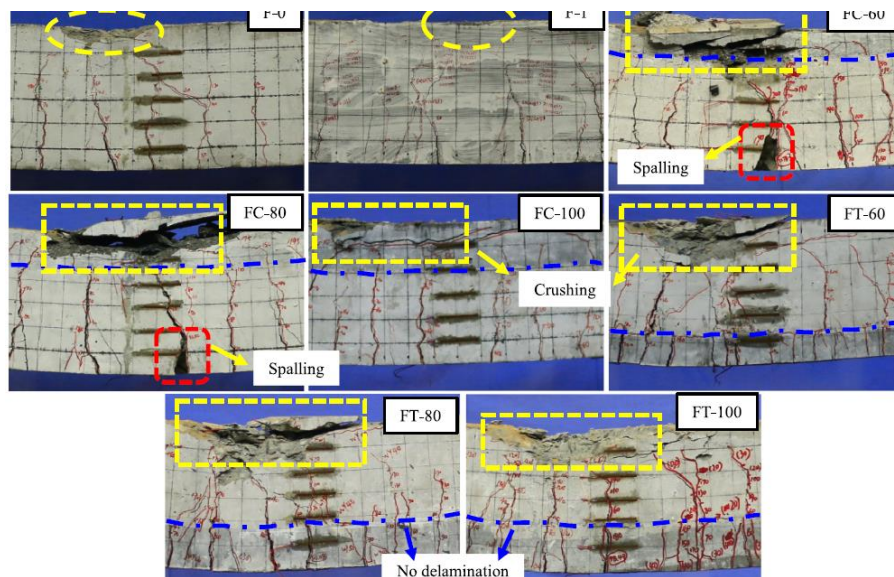
Hasil penelitian menunjukkan bahwa baik penggunaan *wiremesh* hasil daur ulang maupun penggunaan ankur pada tulangan dalam berbagai tipe dan ukuran sama-sama efektif dalam mencegah pengelupasan pada lapisan perkuatan, memungkinkan kinerja kuat tarik dari *wiremesh* hasil daur ulang bekerja secara maksimal dan beban maksimum pada balok meningkat. Pada saat yang sama, *wiremesh* hasil daur ulang juga memainkan peran penting dalam menghambat terjadinya penyebaran retak dengan lebar retak yang menurun. Seiring dengan peningkatan volume tulangan *wiremesh* hasil daur ulang pada balok, kapasitas maksimum dan kekakuan pada balok juga mengalami peningkatan.

Sugira Said (2023) melakukan penelitian terkait pengaruh penambahan sika *grout* pada balok beton bertulang untuk yang telah mengalami kondisi *spalling*. Dalam penelitian ini digunakan SikaGrout 215 yang mempunyai karakteristik tidak menyusut, tidak korosif, dan dapat mengalir dengan baik sehingga dapat dengan mudah mengisi bagian-bagian kecil pada beton dimana digunakan benda uji berupa balok beton bertulang dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm, mutu beton yang digunakan 20 MPa. Benda uji yang dibuat dalam dua variasi yaitu balok beton bertulang tanpa *grouting* yang berfungsi sebagai balok kontrol diberi simbol BK sebanyak 3 buah. Variasi kedua balok beton bertulang dengan penambahan sika *grout* pada daerah tarik balok dan diberi simbol BGR sebanyak 3 buah balok. Hasil penelitian menunjukkan beban maksimum balok BGR menurun 47,62% dibandingkan balok BK. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *grouting* pada balok yang mengalami kerusakan tidak mampu meningkatkan kapasitas kekuatan beton tetapi hanya berfungsi sebagai perbaikan untuk menutupi beton yang mengalami *spalling* agar bentuknya seperti semula. Hasil uji balok BK menunjukkan bahwa semua balok mengalami kegagalan lentur sedangkan untuk balok variasi mengalami kegagalan *debonding*.

Basil. S Al-Shathr, Haedir A. Abdulhamed, dan Mohammed M. Mahdi (2022) melakukan penelitian terkait efek penggunaan *wiremesh* sebagai perkuatan pada balok dengan menggunakan ferro-semen. Dalam penelitian ini, ferro-semen digunakan untuk memperkuat balok beton. Tersedia tiga jenis *wiremesh* yang digunakan dengan mortar semen biasa untuk memperkuat balok beton bertulang dalam menerima beban lentur. Hasilnya menunjukkan bahwa menggunakan lapisan ferro-semen dengan *wiremesh* dengan ukuran persegi 15 mm memiliki pengaruh yang paling tinggi terhadap peningkatan daya dukung dan lendutan balok beton bertulang dibandingkan saat menggunakan dua jenis jerat lainnya. Retakan dan kegagalan pertama peningkatan beban masing-masing sebesar 72% dan 79%. Sebaliknya, defleksi meningkat 70% dan 51% pada beban retak dan kegagalan pertama.

Gang Peng, *et. Al.*, (2022) melakukan penelitian secara eksperimental dan teoritis tentang perilaku lentur balok RC yang diperkuat dengan *grout* semen berdasarkan uji beban statis pada spesimen balok dengan dua posisi perkuatan dan

tiga ketebalan lapisan perkuatan. Parameter penelitian ini adalah membandingkan dan menilai mode kegagalan, hubungan momen–defleksi, distribusi regangan sepanjang tinggi potongan melintang, regangan tulangan longitudinal tarik, dan perilaku retakan dari balok RC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok RC yang diperkuat dengan *grout* semen menunjukkan kapasitas lentur yang serupa atau lebih besar dibandingkan dengan balok RC konvensional, serta mengalami defleksi maksimum yang signifikan lebih besar.



Gambar 3. Mode kegagalan balok benda uji

Oleh karena itu, kami menyimpulkan bahwa *grout* semen dapat digunakan untuk memperbaiki dan memperkuat balok RC yang sudah ada dengan kapasitas mula-mula yang menurun, dan dapat efektif mengembalikan atau meningkatkan kapasitas lentur pad balok RC. Selain itu, posisi perkuatan dan ketebalan sangat mempengaruhi efek perkuatan dari balok RC. Hasil analisis perkembangan retakan menunjukkan perbedaan signifikan dalam hubungan momen–lebar retak antara balok RC yang diperkuat dengan *grout* semen dan balok kontrol.

Penelitian yang dilakukan oleh Luciano Ombres dan Salvatore Verre Ph.D (2019) melakukan penelitian yang memuat tentang perkuatan lentur balok beton bertulang menggunakan *Steel Reinforced Grout* (SRG) baik secara eksperimental di laboratorium maupun secara analitis. Pengujian dilakukan pada empat balok beton bertulang: satu tidak diperkuat (sebagai balok kontrol) dan tiga lainnya

diberi perkuatan SRG. Sistem SRG terbuat dari kain tekstil dari baja galvanis berkekuatan tinggi dari kawat mikro yang dipilin, masing-masing dengan penampang lintang $0,11 \text{ mm}^2$. Balok berukuran panjang 5000 mm dan memiliki penampang berbentuk persegi panjang dengan lebar 140 mm dan tinggi 300 mm. Adapun parameter dari penelitian ini adalah perlu tidaknya angkur dalam menunjang mekanisme perkuatan pada balok SRG.



Gambar 4. Persiapan benda uji balok SRG



Gambar 5. Kegagalan benda uji balok SRG

Hasil penelitian membuktikan bahwa penggunaan SRG pada beton mampu meningkatkan kekuatan dan daktilitas pada beton serta penggunaan angkur hanya berguna dalam mengurangi regangan pada system perkuatan pada balok.

Dedi Vernanda, Mohd Isneini dan Fikri Alami (2019) melakukan penelitian yang membahas perkuatan elemen balok dengan menggunakan perkuatan hybrid yaitu gabungan antara FRP dan *wiremesh* yang diikat dengan lem epoxy resin. Balok mempunyai bentang diantara dua tumpuan sederhana 1,5 m, lebar dan tinggi 15 cm. Balok diuji dengan dua beban titik secara bertahap dari nol sampai dengan runtuh. Balok yang diuji ada 6 buah, 2 buah balok tanpa perkuatan, 4 buah balok

dengan perkuatan 2 lapis GFRP dan 2 lapis *wiremesh*. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa balok dengan perkuatan mampu meningkatkan kapasitas beban sampai dengan 200% dibandingkan balok tanpa perkuatan. Beban retak awal (P_{cr}) balok dengan perkuatan juga meningkat 100% dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan. Namun, balok tanpa perkuatan lebih daktail dibandingkan dengan balok dengan perkuatan.

2.2 Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

Menurut Mosley dan Bugay (1989) kekuatan tarik beton besarnya hanya kira – kira 10% kekuatan tekannya. Nilai kuat tarik yang relatif lebih kecil dari kuat tekan merupakan salah satu kelemahan dari beton biasa.

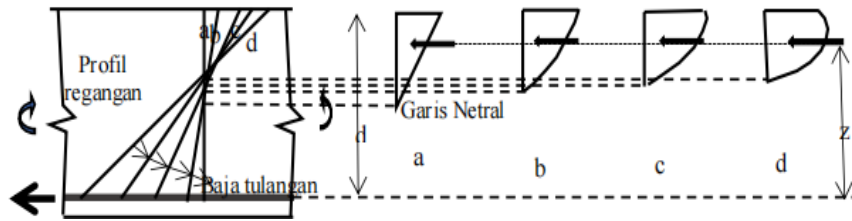
Menurut SNI 03-2847-2013 beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan dapat direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya.

Lentur pada balok merupakan akibat dari adanya regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila beban bertambah, maka pada balok terjadi reformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya (atau bertambahnya) retak lentur di sepanjang bentang balok. Bila bebannya semakin bertambah, pada akhirnya dapat mengakibatkan keruntuhan elemen struktur. Pada saat beban luar mencapai taraf pembebanan demikian disebut keadaan batas keruntuhan karena lentur. Karena itu perencana harus mendisain penampang elemen pada balok sedemikian rupa sehingga tidak terjadi retak yang berlebihan pada saat beban kerja, dan masih mempunyai keamanan yang cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami keruntuhan (Nawy, 2009).

Kekuatan elemen (penampang) yang mengalami lentur tergantung pada distribusi material pada penampang, juga jenis materialnya. Sebagai respon (reaksi) atas adanya lentur yang bekerja pada penampang struktur maka penampang akan memberikan gaya perlawanan (aksi) untuk mengimbangi gaya tarik dan tekan yang terjadi pada penampang (Mulyono, 2004).

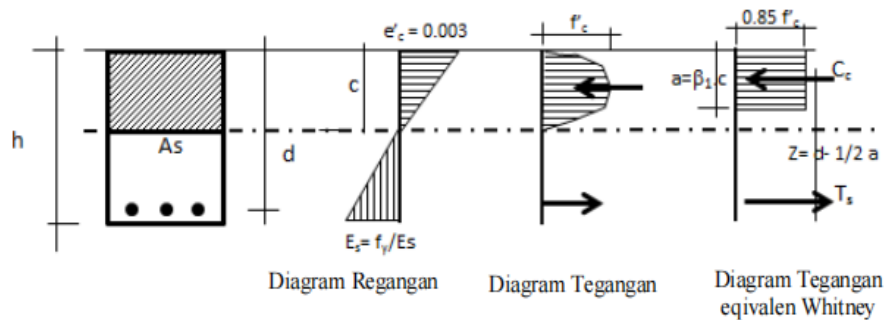
Menurut Park & Paulay (1933), apabila suatu beban bekerja pada balok maka kondisi seimbang antara tegangan – regangan akan lenyap dan diagram tegangan

tekan pada penampang balok beton akan berbentuk setara dengan kurva tegangan – regangan tekan seperti terlihat pada **Gambar 6.** berikut :



Gambar 6. Diagram regangan dan tegangan balok beton bertulang dengan kondisi seimbang

Pada kondisi plastis tegangan beton tekan akan membentuk kurva nonlinier. Kurva tegangan di atas garis netral berbentuk sama dengan tegangan– regangan beton. Kurva tegangan non linier tersebut kemudian disederhanakan oleh Whitney sebagaimana **Gambar 7.** berikut :



Gambar 7. Grafik hubungan tegangan-regangan kondisi plastis

Besar gaya-gaya dalam:

Gaya Tekan: $C_c = 0.85 \times f'c \times b \times a$ (1)

Gaya Tarik: $T_s = A_s \times f_y$ (2)

dan keseimbangan gaya dalam $C_c = T_s$ memberikan hasil tinggi blok tegangan:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c b} \dots\dots\dots (3)$$

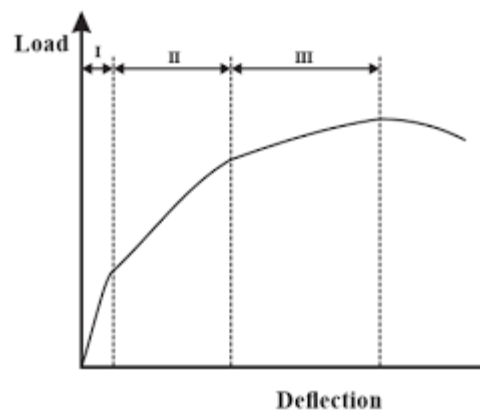
letak garis netral $c = \frac{a}{\beta_1}$ (4)

Momen Nominal: $M_n = C_c(d - \frac{a}{2})$ (5)

$$M_n = T(d - \frac{a}{2}) \dots\dots\dots (6)$$

2.3 Lendutan Pada Balok

Hubungan beban-lendutan balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 8**. Hubungan ini terdiri atas tiga daerah sebelum terjadinya *rupture*. Daerah I: Taraf praretak, dimana batang-batang strukturalnya bebas retak. Daerah II: Taraf pascaretak, dimana batang-batang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik dalam distribusinya maupun lebarnya. Daerah III: Taraf pasca-*serviceability*, di mana tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya (Nawy, 2009).

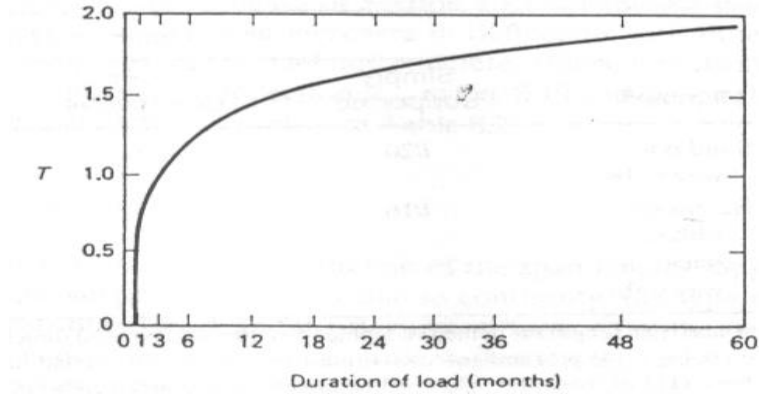


Gambar 8. Hubungan beban – lendutan pada balok

Menurut Nawy (2003), Faktor-faktor yang bergantung pada waktu dapat memperbesar lendutan terhadap bertambahnya waktu. Sebagai akibatnya perencana harus mengevaluasi lendutan sesaat (*immediate*) maupun lendutan jangka panjang (*long-term*) agar lendutan ini terjamin tidak akan melebihi suatu kriteria tertentu. Efek-efek yang bergantung pada waktu ini disebabkan oleh rangkakan (*creep*), susut (*shrinkage*) dan regangan-regangan yang bergantung pada waktu. Regangan-regangan tambahan ini menyebabkan perubahan distribusi tegangan pada beton dan baja tulangan sehingga kelengkungan pada elemen struktural bertambah untuk suatu beban luar yang tetap. Lendutan tambahan akibat beban sustained dan susut jangka panjang yang sesuai dengan prosedur ACI dapat dihitung dengan menggunakan faktor pengali seperti pada persamaan dibawah ini:

$$\lambda = \frac{\xi}{1+50\rho'} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana ρ' adalah rasio penulangan tekan yang dihitung pada lapangan untuk balok ditumpu sederhana dan balok menerus dan balok T adalah faktor yang diambil sebesar 1,0 untuk lama pembebanan 3 bulan, 1,2 untuk lama pembebanan 6 bulan, dan 2,0 untuk lama pembebanan 5 tahun atau lebih.



Gambar 9. Faktor pengali untuk lendutan jangka panjang

Secara teoritis, besarnya nilai lendutan juga dapat dihitung berdasarkan nilai kuat lentur, besarnya nilai titik berat, tinggi efektif dan momen inersia dari elemen struktur dari suatu balok seperti yang ditunjukkan seperti berikut:

$$\delta_{cr} = \frac{f_r \times y}{I_g} \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times L \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\delta_y = \frac{\epsilon_y}{d(1-k)} \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times L \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$\delta_u = \frac{\epsilon_c}{c} \left(\frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \times L \right) \dots\dots\dots (10)$$

Lendutan yang diizinkan pada sistem struktur sangat bergantung pada besarnya lendutan yang masih dapat ditahan oleh komponen-komponen struktur yang berinteraksi tanpa kehilangan penampilan estetis dan tanpa kerusakan pada elemen yang terdefleksi. Akan tetapi struktur-struktur pada masa sekarang dirancang dengan menggunakan prosedur kekuatan batas (*ultimate*), yaitu dengan memanfaatkan kekuatan tinggi baja dengan betonnya. Dengan demikian akan diperoleh elemen-elemen struktur yang semakin langsing dan dalam hal demikian lendutan sesaat maupun jangka panjang sangat perlu dikontrol.

2.4 Retak pada Balok Beton Bertulang

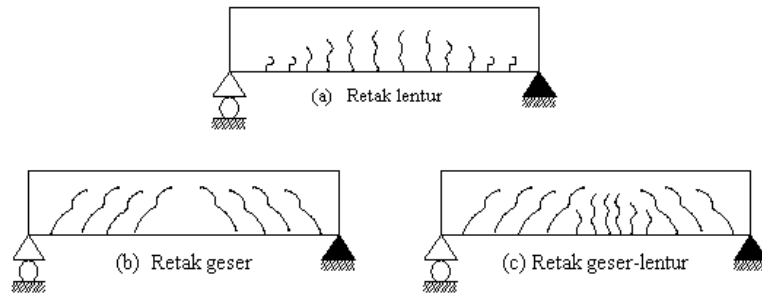
Pola retak pada dasarnya adalah sebuah tanda atau indikasi bahwa suatu struktur pada bangunan akan mengalami kerusakan. Dimana bisa dikatakan bahwa kegagalan suatu struktur bisa dilihat dari pola retak yang terjadi pada struktur. Namun, tidak bisa langsung disimpulkan bahwa suatu struktur mengalami kegagalan apabila ditemui retak pada suatu bangunan tetapi perlu melihat anomali yang terjadi pada suatu struktur bangunan sehingga bisa dikatakan suatu struktur mengalami kegagalan.

Keretakan dapat menimbulkan kerusakan dan keruntuhan konstruksi. Retakan pada beton dipengaruhi oleh tegangan, regangan dan suhu yang akan mengakibatkan kegagalan yang berbeda, sehingga banyak dilakukan optimasi dilakukan seperti pada material, struktur dan proses konstruksi untuk mengurangi pengaruh retak. (Zhu et al., 2020).

Faktor yang menyebabkan retak pada beton sendiri terbagi menjadi dua yaitu saat proses pembuatan beton bertulang dan setelah pembuatan beton (Ulum et al., 2015). Pada saat terjadi keretakan besi tulangan akan mengambil alih penuh beban tarik yang terjadi. Pada balok beton bertulang, lokasi retakan pada daerah tumpuan/ujung balok sisi atas dan tengah bentang sisi bawah. Keretakan yang ada pada komponen beton bertulang bisa timbul pada masa pra-konstruksi maupun pada saat pasca konstruksi. Pada setiap komponen beton bertulang pada sebuah struktur akan mengalami retak, yang perlu diperhitungkan sebenarnya apakah retak tersebut melemahkan kekuatan beton sehingga membahayakan struktur bangunan secara keseluruhan atau tidak. Penyebab terjadinya keretakan pada beton bertulang beberapa macam, antara lain faktor lingkungan dari luar yang mempengaruhi permukaan beton secara langsung maupun karena pengaruh dari sifat beton itu sendiri. Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert, 1990):

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai nilai momen lentur yang lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada balok. (lihat **Gambar 10(a)**).
2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dimana gaya geser maksimum dan tahanan aksial sangat kecil. (lihat **Gambar 10(b)**).

3. Retak geser lentur (*flexural shear crack*), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya. (lihat **Gambar 10(c)**).



Gambar 10. Jenis Retakan pada Beton

2.5 Mode Keruntuhan Balok Beton Bertulang

Tegangan-tegangan pada balok tinggi berbeda dengan tegangan balok normal. Karena geometrinya maka balok tinggi lebih berperilaku dua dimensi bukan satu dimensi. Sebagai akibatnya, bidang datar sebelum melentur tidak harus tetap datar setelah melentur. Distribusi tegangannya tidak lagi linier dan deformasi geser yang diabaikan pada balok biasa menjadi suatu yang cukup berarti dibandingkan dengan deformasi lentur murni (Nawy, 1990).

Geser pada balok tinggi merupakan tinjauan yang utama dalam desainnya. besar dan jarak penulangan geser vertikal dan horisontal sangat berbeda dengan yang dipakai pada balok biasa, begitu pula persamaan-persamaan yang digunakan didalam desainnya (Nawy, 1990).

Pada beberapa test dapat diketahui bahwa mode atau pola keruntuhan sangat kuat tergantung pada $\frac{a}{d}$, dimana: a = jarak dari tumpuan ke beban terpusat, d = tinggi efektif. (Kongdan Evans. 1987), yaitu :

1. Runtuh lentur dimana : $\frac{a}{d} > 6$ Balok yang memiliki perbandingan $\frac{a}{d}$ seperti ini biasanya runtuh pada lentur.
2. Runtuh tarik geser dimana : $6 > \frac{a}{d} > 2,5$ Balok yang memiliki perbandingan $\frac{a}{d}$ lebih kecil daripada 6 condong runtuh di geser. retak diagonal atau miring (1-2-3) dengan penambahan lebih lanjut pada V atau beban, maka kerusakan biasa

terjadi dalam 1 dan 2 mode, jika perbandingan $\frac{a}{d}$ relatif tinggi, retak miring akan menjalar cepat ke e , menghasilkan keruntuhan oleh terpisahnya balok menjadi 2 bagian. Mode keruntuhan ini sering disebut keruntuhan tarik diagonal. Jika perbandingan a/d relatif rendah, retak miring condong berhenti 15 disuatu tempat pada 7. Sejumlah retak yang tak beraturan mungkin mengembang pada beton sekitar penulangan tank longitudinal. Jika V meningkat lebih jauh, retak miring melebar dan menyebar sepanjang tingkat penulangan *tank* (**Gambar 10**). Gaya geser yang meningkat mendesak turun baja longitudinal dan menyebabkan kerusakan pada ikatan antara beton dan baja, biasanya menimbulkan pemisahan pada beton sepanjang 5-6 cm.

2.6 Kegagalan Balok Beton Bertulang

Kegagalan pada balok beton bertulang pada dasarnya bisa dilihat secara visual. Dimana, bisa dilihat dengan adanya fenomena yang terjadi pada beton seperti dipengaruhi oleh melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang.

Menurut Nawy Edward G. (2003), ada tiga kemungkinan yang bisa terjadi yang menyebabkan kegagalan balok beton bertulang, yaitu:

a. Kondisi *Balanced reinforced*

Tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

Kondisi regangan : $\epsilon_c = 0,0003$ dan $\epsilon_s = f_y E_s$

Pada kondisi ini berlaku : $\rho = \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s = \epsilon_y$

b. Kondisi *Over – Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan dalam keadaan *balanced*. Keruntuhan ditandai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu sebelum tulangan baja meleleh.

Pada kondisi ini berlaku: $\rho > \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s < \epsilon_y$

c. Kondisi *Under – Reinforced*

Kondisi ini terjadi apabila tulangan tarik yang dipakai pada balok kurang dari yang diperlukan untuk kondisi *balanced*. Keruntuhan ditandai dengan

lelehnya tulangan baja terlebih dahulu dari betonnya. Pada kondisi ini berlaku : $\rho < 75\% \rho_{balanced}$ dan $\epsilon_s > \epsilon_y$

Balok disebut *under-reinforced* jika balok mempunyai lebih sedikit tulangan dari pada yang diperlukan untuk suatu perbandingan seimbang. Jika sebuah balok berada dalam keadaan *under-reinforced* dan beban ultimit sudah hampir tercapai, baja akan mulai meleleh meskipun tegangan pada beton tekan masih belum mencapai tegangan ultimitnya. Jika beban terus diperbesar, tulangan akan memanjang sehingga terjadi lendutan dan muncul retak besar pada beton tarik. Kondisi ini menjadi peringatan bahwa beban harus dikurangi atau struktur akan rusak dan runtuh. Hal inilah yang menjadi pertimbangan suatu balok harus didesain tetap dalam kondisi *under-reinforced*. Peningkatan komponen struktur lentur boleh dilakukan dengan menambahkan pasangan tulangan tekan dan tulangan tarik secara bersamaan. Dalam perencanaan elemen struktur, suatu elemen struktur harus direncanakan berada pada kondisi *under-reinforced*.

2.7 Metode Perbaikan dan Perkuatan

Menurut Fakhruddin (2023) Perbaikan dan perkuatan struktur beton sudah cukup lama dikembangkan dan berbagai penelitian juga telah dilakukan. Perbaikan dan perkuatan adalah dua hal yang berbeda. Istilah perbaikan (*repairing*) diterapkan pada bangunan yang telah rusak, dimana telah terjadi penurunan kekuatan untuk dikembalikan seperti semula. Contoh kerusakan struktur adalah retak dan terkelupasnya selimut beton (*spalling*) dimana kedua jenis kerusakan tersebut perlu segera diperbaiki untuk menghindari terjadinya kerusakan yang lebih parah. Metode perbaikan pada elemen struktur yang retak dilakukan dengan metode injeksi dengan pasta semen maupun material epoxy sehingga dapat mengisi sekaligus merekatkan kembali beton yang terpisah. Sementara itu, metode perbaikan pada elemen struktur yang mengalami *spalling* dapat dilakukan dengan metode *patching* atau *grouting*.

Perkuatan struktur (*strengthening*) adalah proses peningkatan kapasitas struktur melebihi kapasitas awal ketika struktur didesain. Kapasitas struktur akan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu atau usia dari struktur tersebut yang mengakibatkan tidak terpenuhinya lagi persyaratan-persyaratan yang

bersifat teknik yaitu kekuatan, kekakuan dan daktilitas, kestabilan, serta ketahanan terhadap kinerja tertentu (Triwiyono, 1998). Maka dari itu diperlukan upaya untuk mengembalikan bahkan meningkatkan kekuatan strukturnya melebihi kapasitas awal ketika struktur didesain. Dalam penerapannya, perkuatan pada elemen struktur diaplikasikan baik pada struktur baru maupun struktur lama. Perkuatan pada struktur baru, diaplikasikan ketika terjadi kegagalan desain atau mutu yang tidak tercapai selama konstruksi. Sementara pada struktur lama, diaplikasikan pada elemen struktur yang terpengaruh lingkungan, umur bangunan maupun perubahan fungsi dan standarisasi bangunan. Beberapa metode perkuatan yang umumnya dilakukan pada struktur beton adalah memperpendek bentang struktur dengan kolom atau baja, memperbesar dimensi (*concrete jacketing*), penambahan pelat baja (*steel plate*), system prategang dan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

2.8 Mortar Grouting

Berdasarkan SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri atas agregat halus (pasir), bahan perekat (tanah liat, kapur, semen Portland) dan air dengan komposisi tertentu. Mortar memiliki nilai penyusutan yang relatif kecil. Mortar harus tahan terhadap penyerapan air serta kekuatan geser yang dapat memikul gaya-gaya yang bekerja pada mortar tersebut. Jika penyerapan air pada mortar terlalu besar maka mortar akan mengeras dengan cepat dan kehilangan adhesinya. Fungsi mortar dalam konstruksi bangunan sipil adalah sebagai bahan perekat dalam pekerjaan pasangan batu atau bata, penutup permukaan pasangan juga sebagai pengisi rongga diantara pasangan batu. perkembangan pembangunan fasilitas fisik bangunan sipil dibutuhkan pula mortar yang mempunyai kuat tekan tinggi. Meningkatkan kuat tekan mortar sampai batas tertentu dapat dilakukan dengan dengan menambah porsi jumlah semen portland. Namun pemakaian semen portland yang berlebihan dapat mendorong terjadinya retak pada pasangan ketika terjadi penyusutan pada semen.

Aspek sifat mekanis yang penting dari mortar adalah kuat tekannya. Kuat tekan mortar adalah kemampuan mortar untuk menahan beban tekan. Kuat tekan mortar ditentukan dengan uji tekan terhadap benda uji kubus mortar ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm pada umur 28 hari. Faktor yang mempengaruhi kuat tekan mortar adalah

diantaranya: bahan - bahan penyusun (air, semen, agregat, bahan tambah); metode pencampuran, meliputi proporsi bahan, pengadukan, pengecoran dan pemadatan; dan perawatan pasca pengecoran/pemasangan.

Injeksi semen bertekanan/sementasi (*grouting*) adalah suatu proses, di mana suatu cairan diinjeksikan/disuntikan dengan tekanan sesuai uji tekanan air (*water pressure test*) ke dalam rongga, rekah dan retakan batuan/tanah, yang mana cairan tersebut dalam waktu tertentu akan menjadi padat secara fisika maupun kimiawi.

Mortar *grouting* adalah bahan pengisi yang digunakan untuk perbaikan suatu komponen struktur. Sika *Grout 215* merupakan salah satu produsen bahan bangunan dan produk kimia yang sering digunakan dalam suatu proyek konstruksi. Dalam pengerjaan *grouting* tentunya dibutuhkan semen *grouting* yang siap pakai dan mempunyai karakteristik tidak susut, dapat mengalir dengan baik serta memenuhi persyaratan standar *corps of engineering* CDR C-621 dan ASTM C-1107 yang keseluruhannya terdapat pada Sika *Grout 215*. Sika *Grout 215* berfungsi sebagai komponen semen *grouting* untuk memperbaiki beton yang keropos dan juga untuk pengisi celah dan rongga, serta dapat diaplikasikan pada stuktur bangunan.

Tabel 1. Karakteristik Sika *Grout 215*

Sifat- Sifat Material <i>Grouting</i>			
Sifat- Sifat		Nilai Test	
Kuat Tekan	1 day	25.0 N/mm ²	(ASTM C-109)
	3 days	40.0 N/mm ²	
	7 days	52.0 N/mm ²	
	28 days	65.0 N/mm ²	
Kuat Tarik Lentur	28 days	> 6.0 N/mm ²	(ASTM C-348)
Kuat Tarik Adhesi	28 days	>1.5 N/mm ² (Kegagalan Beton) >2.5 N/mm ²	
Expansion	1 – 3 h (at ± 27°C)	0.30 – 1.40%	(ASTM C-940)

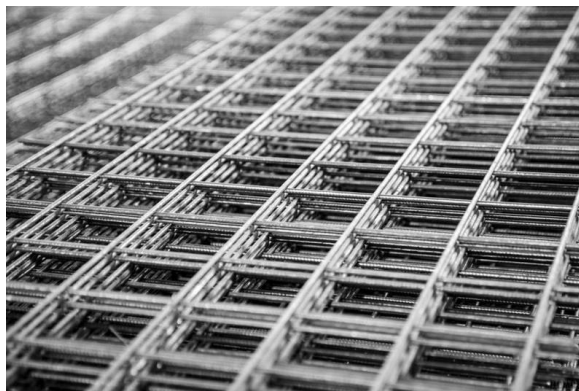
Sumber : Sika Indonesia

2.9 Wiremesh

Wiremesh adalah suatu bahan penulangan baja yang terbuat dari kawat baja yang dilas dan memiliki jarak antar kawat yang seragam yang digunakan dalam

perkuatan dalam beton (Sari, 2011). Dimana mulai dari pemilihan material atau bahan yaitu besi melalui kontrol yang ketat kemudian di las dengan mesin las otomatis yang berteknologi tinggi, sehingga menghasilkan *wiremesh* berkualitas tinggi. Menurut ACI 549.1R93 kawat anyam yang digunakan untuk perkuatan memiliki persyaratan bersih dan bebas dari debu, karat lepas, lapisan cat, minyak, atau zat serupa. Desain kekuatan kawat anyam didasarkan pada kekuatan luluh f_y tetapi tidak boleh melebihi 100.000 psi (690 MPa).

Salah satu aplikasi penggunaan *wiremesh* yaitu untuk penambahan kapasitas lentur pada perkuatan balok beton bertulang dengan metode retrofit yang menggunakan material *wiremesh* dan *self compacting concrete* (SCC) (Amirudin, 2014). Selain untuk penambahan kapasitas lentur, aplikasi lain dari *wiremesh* yaitu pada penggunaannya terhadap *ferro-cement*. *Ferro-cement* adalah konstruksi beton tipis yang dibentuk dengan pasir, semen, air dan *wiremesh* sebagai pengganti tulangan, penggunaan *ferro-cement* biasanya digunakan pada konstruksi yang memerlukan bentuk lengkung atau parabol serta beban yang ringan, seperti pada kubah masjid, pembangunan saluran air, serta pembuatan simbol daerah. Tipe *wiremesh* dengan kabel berjarak dekat dengan bukaan persegi adalah perkuatan yang paling umum digunakan seperti terlihat pada **Gambar 11**.



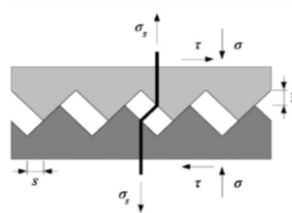
Gambar 11. *Wiremesh*

2.10 Teori Lekatan Beton Lama dan Beton Baru

Renyuan Qin (2019) menyatakan bahwa *interface* beton baru ke beton yang lama dapat dilihat dalam perbaikan dan perkuatan struktur beton seperti *concrete jacketing* atau perbaikan beton dengan mortar berkinerja tinggi (termasuk

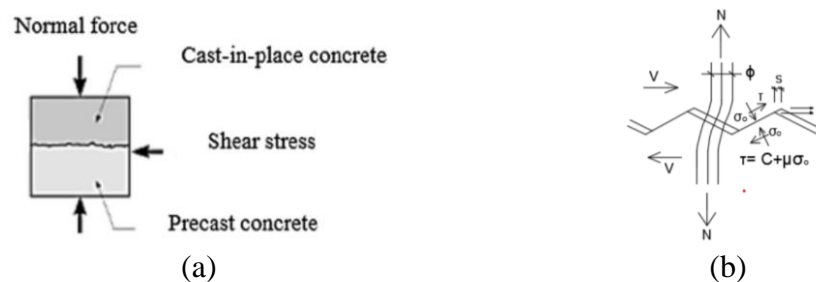
penambahan serat *fiber* pada mortar) maupun mortar *grout* itu sendiri. Salah satu perbedaan utama antara beton baru dan beton lama adalah bahwa penyusutan beton baru jauh lebih tinggi daripada beton lama selama proses pengerasannya. Perbedaan dalam volume ini menghasilkan ketidakcocokan antar beton baru dan beton lama untuk dijadikan sebagai bahan perbaikan dan perkuatan.

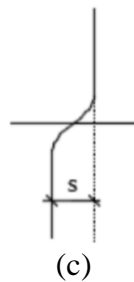
(Fakhrudin, 2017) Metode desain untuk menilai kekuatan geser *interface* beton ke beton telah berubah selama bertahun-tahun. Prinsip kerja sambungan geser dapat dijelaskan paling sederhana melalui teori gesekan geser, yang dikembangkan menjelang akhir tahun 1960-an di Amerika Serikat dan menggambarkan sambungan melalui model gigi gergaji sederhana seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 12**. Menurut model ini, ketika permukaannya kasar, tegangan geser tidak hanya menyebabkan perpindahan paralel, tetapi juga pembukaan sambungan, yang menimbulkan tegangan tarik di setiap *interface* persilangan tulangan. Ini pada bagiannya menciptakan tekanan tekan yang menyamakan pada sambungan, memungkinkan gaya gesek terbentuk.



Gambar 12. Gesekan geser

Kekuatan geser pada *interface* beton ke beton dapat digambarkan dengan kombinasi tiga mekanisme pemikul beban yang berbeda, terdiri atas: a) ikatan perekat dan *interlock* mekanis, b) gesekan, dan c) ketahanan lentur tulangan atau sambungan baja pada **Gambar 13**.





Gambar 13. Mekanisme ketahanan geser *interface*

a) Ikatan Perekat dan *Interlock* Mekanis

Ikatan perekat (gaya perekat), karena ikatan kimia dan fisik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 13(a)**, dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap ketahanan keseluruhan. Selain ikatan perekat, pengerasan yang tepat dan menghasilkan kontur permukaan yang tidak beraturan dapat menyebabkan efek *interlocking* mekanis yang kuat.

b) Gesekan

Dalam kasus gaya kompresi tegak lurus terhadap *interface*, resistensi gesek berkembang tergantung pada tingkat kekasaran permukaan. Efek kompresi dapat diberikan oleh aksi eksternal atau gaya prategang, atau secara alternatif dihasilkan dari kendala karena tulangan luar. Tahanan gesek berkembang berbanding lurus dengan komponen gaya kompresi eksternal yang bekerja tegak lurus terhadap *interface*.

c) Ketahanan Lentur Konektor Baja (Aksi Dowel)

Slip geser sepanjang *interface* yang dilintasi oleh tulangan atau konektor menyebabkan perpindahan lateral konektor atas dan bawah (**Gambar 13(c)**) sehingga menginduksi tegangan lentur pada tulangan yang ditumpangkan oleh gaya tarik aksial karena bukaan sambungan. Dalam literatur yang relevan, resistansi terhadap tekukan umumnya disebut sebagai aksi Dowel.