

SKRIPSI

**EFEK PENGEKANGAN PADA BETON HHF SUBSTITUSI
SEMEN TERHADAP KEKUATAN LEKATAN BETON
BERTULANG**

Disusun dan diajukan oleh:

**SHEREN VIOLA GLORIA MARPAUNG
D011 20 1127**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**EFEK PENGEKANGAN PADA BETON HHF SUBSTITUSI SEMEN
TERHADAP KEKUATAN LEKATAN BETON BERTULANG**

Disusun dan diajukan oleh

SHEREN VIOLA GLORIA MARPAUNG
D011 20 1127

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 9 Oktober 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr.Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST, MT.

NIP: 197912262005011001

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr-Ing. Ir. Herman Parung, M. Eng., IPU

NIP: 196207291987031001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng

NIP: 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Sheren Viola Gloria Marpaung
NIM : D011201127
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Efek Pengekangan pada Beton HHF Substitusi Semen terhadap Kekuatan
Lekatan Beton Bertulang

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, 9 Oktober 2024

Yang Menyatakan



Sheren Viola Gloria Marpaung

ABSTRAK

SHEREN VIOLA GLORIA MARPAUNG. EFEK PENGEKANGAN PADA BETON HHF SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP KEKUATAN LEKATAN BETON BERTULANG (dibimbing oleh Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST, MT dan Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng)

Beton telah mengalami banyak kemajuan dalam hal pembuatan komposisinya dan pelaksanaan dalam proses konstruksi. Sifatnya yang mudah dibentuk, tahan terhadap temperatur tinggi, lebih ekonomis dibandingkan baja serta memiliki kekuatan tekan yang tinggi merupakan karakteristik beton yang menguntungkan dalam bidang konstruksi. Salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan tarik beton adalah dengan menggunakan serat. Dengan menggabungkan serat, beton dapat mencapai peningkatan daya tahan dan kinerja, menjadikannya bahan yang berharga dalam industri konstruksi. Pemanfaatan limbah rambut manusia sebagai salah satu material pembuat beton yang ramah lingkungan menjadi penting dalam membantu mereduksi jumlah limbah rambut manusia karena ketersediaannya di alam yang melimpah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lekatan beton dengan HHF sebagai substitusi semen dengan tulangan pengekang dan tanpa tulangan pengekang.

Metode yang digunakan adalah pengujian *pull-out* tulangan baja yang ditanam pada silinder beton dimensi 150×300 mm dengan kekuatan tekan rencana $f'c = 25$ MPa. Pengujian menggunakan alat *Universal Testing Machine* kapasitas 1000 kN. Benda uji pada penelitian ini adalah beton HHF substitusi semen dengan variasi persentase 0% dan 2% dengan panjang 60 mm serta menggunakan tulangan spiral.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai tegangan lekat menurun seiring dengan peningkatan penggunaan HHF sebagai substitusi semen dalam campuran beton baik pada sampel tanpa tulangan spiral (TS) maupun sampel dengan tulangan spiral (S), dengan persentase penurunan diperoleh pada variasi campuran beton 2%HHF yaitu sebesar 6.98% untuk sampel TS dan sebesar 17.32% untuk sampel S dibandingkan dengan sampel 0%HHF pada umur 28 hari. Sampel S memiliki nilai tegangan lekat yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel TS. Tegangan lekat sampel NS-HHF0% meningkat sebesar 71.62% dengan menggunakan tulangan spiral dibandingkan dengan sampel 0%HHF-TS begitu pula dengan sampel BS-HHF2% tegangan lekatnya meningkat sebesar 52.54% dibandingkan dengan sampel 2%HHF-TS. Sehingga, pengekangan tulangan spiral sebagai efek *confinement* mempengaruhi kekuatan lekatan beton HHF sebagai substitusi semen.

Kata Kunci: Beton, HHF, Semen, Tulangan Spiral, *Pull-out*, Tegangan Lekat

ABSTRACT

SHEREN VIOLA GLORIA MARPAUNG. *EFFECTS OF RESTRAINT IN CEMENT SUBSTITUTED HHF CONCRETE ON THE BOND STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE* (supervised by Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST, MT and Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng).

Concrete has undergone many advances in terms of its composition and implementation in the construction process. Its malleable nature, resistance to high temperatures, more economical than steel and high compressive strength are favorable characteristics of concrete in the construction field. One way to increase the tensile strength of concrete is by using fibers. By incorporating fibers, concrete can achieve improved durability and performance, making it a valuable material in the construction industry. The utilization of human hair waste as an environmentally friendly concrete making material is important in helping to reduce the amount of human hair waste due to its abundant availability in nature. This study aims to analyze the bond behavior of concrete bars with HHF as a cement substitute with reinforcing bars and without reinforcing bars.

The method used is a pull-out test of steel reinforcement planted in concrete cylinders of dimension 150×300 mm with a plan compressive strength of $f'_c = 25$ MPa. Testing using a Universal Testing Machine with a capacity of 1000 kN. The test specimens in this study are cement substituted HHF concrete with a percentage variation of 0% and 2% with a length of 60 mm and using spiral reinforcement.

The test results show that the value of bond stress decreases with the increase in the use of HHF as a cement substitute in the concrete mix for both samples without spiral reinforcement (TS) and samples with spiral reinforcement (S), with the percentage decrease obtained in the 2%HHF concrete mix variation which is 6.98% for the TS sample and 17.32% for the S sample compared to the 0%HHF sample at the age of 28 days. Sample S has a higher bond stress value compared to sample TS. The bond stress of NS-HHF0% sample increased by 71.62% by using spiral reinforcement compared to 0%HHF-TS sample as well as BS-HHF2% sample, the bond stress increased by 52.54% compared to 2%HHF-TS sample. Thus, the restraint of spiral reinforcement as confinement effect affects the bond strength of HHF concrete as cement substitute.

Keywords: Concrete, HHF, Cement, Spiral Reinforcement, Pull-out, Bond Strength

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Beton dan Bahan Penyusunnya.....	8
2.2.1 Semen Portland Komposit.....	9
2.2.2 Agregat.....	11
2.2.3 Air.....	13
2.2.4 <i>Human Hair Fiber</i>	14
2.3 Pengekangan Tulangan Spiral.....	18
2.4 Pengujian <i>Pull-Out</i>	20
2.5 Lekatan antara Beton dan Tulangan.....	21
2.6 Panjang Penyaluran Dasar l_d	24
2.7 Tipe Keruntuhan.....	26
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	28
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	29
3.3 Metode Penelitian dan Sumber Data.....	29
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	30
3.5 Pemeriksaan Karakteristik Baja.....	31
3.6 Pemeriksaan Karakteristik Material.....	32
3.6.1 Agregat Kasar.....	32
3.6.2 Agregat Halus.....	32
3.7 Pembuatan Benda Uji.....	33
3.8 Perawatan Benda Uji.....	36
3.9 <i>Set-Up</i> Pengujian.....	37
3.9.1 <i>Set-Up</i> Pengujian <i>Pull-Out</i>	37
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1 Karakteristik Material.....	38

4.1.1 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tulangan Baja.....	38
4.1.2 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat	38
4.1.3 Hasil Pemeriksaan Kadar Air <i>Human Hair Fiber</i> (HHF)	40
4.2 Komposisi <i>Mix Design</i>	41
4.3 Hasil Pengujian Beton.....	41
4.3.1 Tegangan Lekat Baja Tulangan pada Beton.....	41
4.3.2 Perhitungan Panjang Penyaluran Minimum.....	50
4.3.3 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	52
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	56
5.1 Kesimpulan	56
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Skema Penampang Melintang dari Serat Rambut.....	16
Gambar 2. Pengolahan limbah rambut (a. Pencarian limbah rambut; b. Pengumpulan limbah rambut; c. Proses pemisahan limbah rambut dari kotoran; d. Proses pencucian limbah rambut; e. Proses pengeringan dan penyortiran rambut)..	18
Gambar 3. Tulangan Spiral pada Kolom.....	19
Gambar 4 Kurva tegangan dan regangan pada beton terkurung (<i>confined</i>).....	19
Gambar 5. Gaya tekan antara beton di dalam sengkang dan beton di luar sengkang	20
Gambar 6. Pengujian Pull Out	21
Gambar 7. Pengangkuran dan Lekatan Lentur Tulangan Tarik.....	22
Gambar 8. Panjang Tulangan (l_d) yang Tertanam dalam Beton	25
Gambar 9. Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 10. Bahan-Bahan Penelitian	31
Gambar 11. Sketsa Benda Uji	33
Gambar 12. Benda Uji dengan Spiral	34
Gambar 13. Persiapan Material.....	34
Gambar 14. Proses Pencampuran Material	35
Gambar 15. Pengujian Slump	35
Gambar 16. Perawatan Benda Uji.....	36
Gambar 17. Pengujian Pull-Out	37
Gambar 18. Hubungan Beban-Slip Sampel Kontrol NS-HHF0% dan HHF-TS0% .	42
Gambar 19. Tipikal Keruntuhan Sampel HHF-TS0% Setelah di Uji Pull-Out	43
Gambar 20. Tipikal Keruntuhan Sampel NS-HHF0% Setelah di Uji Pull-Out.....	43
Gambar 21. Hubungan Beban-Slip Sampel BS-HHF2% dan HHF-TS2%	44
Gambar 22. Tipikal Keruntuhan Sampel HHF-TS2% Setelah di Uji Pull-Out	45
Gambar 23. Tipikal Keruntuhan Sampel BS-HHF2% Setelah di Uji Pull-Out	45
Gambar 24. Hubungan Beban-Slip Beton 0%HHF dan 2%HHF Tanpa Spiral (TS)	46
Gambar 25. Hubungan Beban-Slip Beton 0%HHF dan 2%HHF dengan Spiral (S)	46
Gambar 26. Hubungan Beban-Slip Beton 0%HHF dan 2%HHF Gabungan antara Spiral (S) dan Tanpa Spiral (TS).....	47
Gambar 27. Tegangan Lekatan Sampel Beton HHF.....	49
Gambar 28. Hubungan l_d min dan τ_u	51
Gambar 29. Mikrofoto SEM Sampel 0%HHF.....	53
Gambar 30. Mikrofoto SEM Sampel 2%HHF.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Susunan Butiran Agregat Kasar	12
Tabel 2. Batas-Batas Gradasi Agregat Halus	12
Tabel 3. Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	32
Tabel 4. Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	32
Tabel 5. Rincian Benda Uji	33
Tabel 6. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tulangan Baja.....	38
Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus	39
Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar	39
Tabel 9. Nilai Kadar Air Berbagai Serat Alam	41
Tabel 10. Rancangan Campuran Beton.....	41
Tabel 11. Rekapitulasi Tegangan Lekat (τ_u) Sampel Tanpa Spiral (TS)	48
Tabel 12. Rekapitulasi Tegangan Lekat (τ_u) Sampel dengan Spiral (S).....	48
Tabel 13. Rekapitulasi Panjang Penyaluran Minimum Sampel Tanpa Spiral (TS)	50
Tabel 14. Rekapitulasi Panjang Penyaluran Minimum Sampel dengan Spiral (S).....	50
Tabel 15. Rekapitulasi Panjang Penyaluran Minimum Berdasarkan SNI 2847:2019.....	51

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
MPa	<i>Megapascal</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
FAS	Faktor Air Semen
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
SNI	Standar Nasional Indonesia
ASTM	<i>American Standart Testing and Material</i>
$f'c$	Kekuatan tekan beton
N	Newton
mm	Milimeter
μm	Mikrometer
cm	Sentimeter
m	Meter
kg	Kilogram
A	Luas Penampang benda uji
P	Beban Tekan
L	Panjang benda uji
D	Diameter benda uji
PCC	<i>Portland Composite Cement</i>
SSD	<i>Saturated Surface Dry</i>
E	Regangan
P	Beban (N)
μ	Kekuatan lekat antara beton dengan tulangan (Mpa)
L_d	Panjang penanaman (mm)
d_s	Diameter tulangan (mm)
ff_y	Tegangan leleh baja (Mpa)
A_s	Luas tulangan (mm^2)
k	Koefisien panjang penyaluran minimum

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengambilan Limbah Rambut	62
Lampiran 2. Perawatan Limbah Rambut Menjadi HHF	62
Lampiran 3. Pembuatan Tulangan Baja dan Persiapan Tulangan Spiral	62
Lampiran 4. Persiapan Material Pengecoran	63
Lampiran 5. Proses Pengecoran dan Pengujian Nilai Slump	64
Lampiran 6. Proses Pengujian <i>Pull-out</i>	65
Lampiran 7. Kondisi Benda Uji Setelah Diuji	65

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis persembahkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tugas Akhir yang berjudul “EFEK PENGEKANGAN PADA BETON HHF SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP KEKUATAN LEKATAN BETON BERTULANG” yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak **Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST, MT, IPM, ASEAN.Eng.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bapak **Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.** dan **Dr. Eng. Bambang Bakri, ST, MT.**, selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak **Dr.Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT.**, selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. Bapak **Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng.**, selaku Dosen Pembimbing II, yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada kami.
5. Bapak **Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.

6. Kak **Hasan, ST.**, selaku Laboran Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan selama pelaksanaan penelitian di laboratorium.
7. Seluruh dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Seluruh staf dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Rudolf Marpaung** dan ibunda **Marlina Zusanty** atas doa, kasih sayangnya, dan segala dukungan selama ini, baik spiritual maupun materi, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
2. Saudara **Delpiere Filipo Rapachi Marpaung, Zhefanyo Sevenso Parningotan Marpaung**, dan **Moses Daren Marpaung** yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Teman-teman **Si Paling Gempa** selaku rekan TA yang senantiasa memberi masukan, bantuan dan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Seluruh **rekan-rekan di Laboratorium Riset Gempa dan Rekayasa Struktur**, yang senantiasa memberikan semangat dan memberi warna kebersamaan di Lab.
5. Keluarga **KMKO SIPIL** dan **KMKO Teknik**, terkhusus Angkatan 2020 yang senantiasa memberikan dukungan dan doa dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Saudara-saudari **Entitas 2021** atas waktu, kenangan, dan semangatnya yang tak terkira, semoga tetap solid dan maju, terima kasih karena telah menjadi salah satu pendukung setia dalam penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat berterima kasih apabila ada yang berkenan untuk memberikan koreksi, saran, maupun kritik yang konstruktif dalam penyusunan yang lebih baik. Akhir kata, semoga Tuhan Yesus Kristus

melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Juli 2024

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton telah mengalami banyak kemajuan dalam hal pembuatan komposisinya dan pelaksanaan dalam proses konstruksi. Beton adalah campuran antara kerikil/batu pecah, pasir, air, serta semen (PC) dengan perbandingan berat yang tertentu (*mix design*). Beton merupakan suatu bahan yang mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, tetapi lemah terhadap gaya tarik. Satu kemajuan dalam beton adalah menciptakan kombinasi antara beton dan baja tulangan yang membentuk satu kesatuan konstruksi yang dikenal sebagai beton bertulang. Beton bertulang menjadi salah satu material yang banyak digunakan sebagai sistem struktur infrastruktur sipil seperti bendungan, jembatan, sistem penahan tanah, serta bangunan gedung. Beton bertulang merupakan suatu bahan bangunan yang kuat, tahan lama, dan dapat dibentuk dalam berbagai bentuk serta ukuran (Widiacahyani, et al., 2021).

Beton bertulang serat (FRC) adalah jenis beton yang menggunakan bahan berserat untuk meningkatkan sifat strukturalnya. Penggunaan serat sebagai penguat sudah ada sejak zaman dahulu, di mana bahan seperti bulu kuda ditambahkan ke jerami dan mortar pada batu bata lumpur. Konsep material komposit menjadi terkenal pada tahun 1950-an, dan beton bertulang serat menjadi topik yang sangat menarik. Untuk menggantikan asbes, bahan alternatif seperti kaca, baja, dan serat sintesis diperkenalkan sebagai penguat beton. Beton bertulang serat biasanya terdiri dari serat-serat pendek yang berorientasi acak dan didistribusikan secara merata di dalam matriks beton. Serat-serat ini meningkatkan sifat mekanik beton, seperti kekuatan tarik, ketangguhan, dan ketahanan retak. Serat-serat ini bertindak sebagai jaringan penguat, memberikan integritas struktural tambahan dan mencegah penyebaran retakan. Pengembangan dan penggunaan berbagai jenis serat dalam tulangan beton terus berkembang. Para peneliti dan insinyur mengeksplorasi karakteristik dan kinerja berbagai serat untuk mengoptimalkan sifat-sifat beton bertulang serat untuk aplikasi tertentu. Dengan menggabungkan serat, beton dapat mencapai peningkatan daya tahan dan kinerja,

menjadikannya bahan yang berharga dalam industri konstruksi (Kumar, et al., 2023).

Potongan rambut manusia adalah serat yang tersedia secara alami, dan tidak dapat terurai secara hayati. Rambut manusia memiliki kekuatan tarik tinggi yang setara kawat tembaga dengan diameter yang sama. Serat ini tersedia dalam jumlah yang banyak dan tidak dipungut biaya. Penggunaan rambut manusia sebagai tulangan sekunder/bahan tambahan untuk menghindari keretakan beton, untuk mengontrol penyusutan plastis dan pengeringan beton. Titik leleh rambut manusia bervariasi dari 1550°C hingga 1800°C, dan tidak terlalu rapuh. Untuk mengatasi spalling pada beton, serat polypropylene digunakan pada praktik umum. Penambahan rambut manusia sebagai serat pada beton dapat mengurangi spalling pada beton. Spalling beton terjadi antara 1900°C hingga 2500°C. Pada saat yang sama, titik leleh rambut manusia adalah sekitar 1550°C hingga 1800°C. Penggunaan rambut manusia pada beton akan mengurangi tekanan uap internal dan menghilangkan kemungkinan terjadinya *spalling*. Kehalusan dan panjangnya rambut manusia dapat mengurangi *spalling* dan meningkatkan kinerja beton. Dari literatur, diketahui bahwa penggunaan rambut manusia berukuran 60-90 µm dan panjang 12-15 mm secara efektif membuat beton menjadi kuat dan tahan lama (Manjunatha, et al., 2021).

Salah satu metode yang digunakan untuk memperoleh beton bertulang yang memiliki daktilitas cukup tinggi yaitu dengan memberikan pengekangan pada beton (*confinement*). Beberapa studi telah mengindikasikan bahwa pengekangan dapat meningkatkan daktilitas beton bertulang (Sudarsana, 2010). Efek pengekangan pada beton merupakan pengaruh yang ditimbulkan akibat adanya tulangan pengekang yang terpasang di dalamnya. Tulangan pengekang tersebut bisa berupa tulangan spiral atau persegi. Efek pengekangan tersebut mengakibatkan tegangan dan regangan beton meningkat atau lebih besar dibandingkan beton yang tidak menggunakan pengekang (Abisetoyo, W., 2010).

Kemampuan antara tulangan dan beton untuk menahan gaya yang dapat menyebabkan lekatan antara tulangan dan beton terlepas disebut kekuatan lekat (Winter & Nilon, 1993). Kegagalan pada struktur dapat terjadi apabila lekatan antara beton dan baja tulangan pada struktur itu hilang. Untuk menghindari hal

tersebut perlu ditinjau nilai kuat lekat beton dan baja tulangan agar diperoleh keseimbangan antara beton dan baja tulangan yaitu gaya yang dapat ditahan beton dan gaya yang dapat ditahan oleh tulangan. Salah satu dari tiga jenis pengujian untuk dapat menentukan kualitas lekatan elemen tulangan adalah *pull-out test* (Edward G. Nawy, 1990). Percobaan *pull-out* dapat memberikan perbandingan lekatan yang efisien terhadap berbagai variasi permukaan tulangan dan panjang tulangan yang tertanam di dalam beton karena gaya yang digunakan adalah gaya tarik aksial sehingga menimbulkan tegangan lekat aksial pula.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penulis melakukan penelitian mengenai pengujian *pull-out* untuk mengetahui perilaku lekatan antara baja tulangan dengan beton *Human Hair Fiber* (HHF) sebagai pengganti semen, dengan persentase substitusi HHF yaitu 2% dengan panjang 60mm. Penelitian ini dimanifestasikan dalam sebuah Tugas Akhir (Skripsi) dengan judul:

**“EFEK PENGEKANGAN PADA BETON HHF SUBSTITUSI SEMEN
TERHADAP KEKUATAN LEKATAN BETON BERTULANG”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lekatan beton dengan HHF sebagai substitusi semen 2% tanpa tulangan pengekang?
2. Bagaimana perilaku lekatan beton dengan HHF sebagai substitusi semen 2% dengan tulangan pengekang?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis perilaku lekatan beton dengan HHF sebagai substitusi semen 2% tanpa tulangan pengekang,
2. Menganalisis perilaku lekatan beton dengan HHF sebagai substitusi semen 2% dengan tulangan pengekang,

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan informasi pengaruh tulangan pengekang terhadap rekatan antara baja tulangan dengan beton HHHF sebagai substitusi semen 2%,
2. Memberikan informasi perilaku lekatan antara baja tulangan dengan beton HHHF sebagai substitusi semen 2%,
3. Sebagai informasi dan referensi bagi penelitian lanjutan berkaitan dengan beton bertulang yang menggunakan HHHF sebagai substitusi semennya.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk mencapai tujuan penelitian dan menghindari pembahasan di luar dari konsep penelitian, maka pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beton HHHF dengan persentase 2% dan panjang 60mm sebagai substitusi semen.
2. Limbah rambut yang digunakan adalah limbah rambut yang didapatkan di salon, *barber shop*, dan pangkas rambut.
3. Metode perawatan pada limbah rambut adalah dengan cara dipisahkan dari bahan limbah (tisu, silet, kertas dsb), lalu dicuci bersih menggunakan sampo untuk menghilangkan kotoran, dan yang terakhir rambut dikeringkan di bawah sinar matahari atau dengan cara lain yang sesuai.
4. Semen yang digunakan adalah semen portland komposit (PCC) merek Tonasa.
5. Pengujian *Pull-out* menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) kapasitas 1000kN dengan modifikasi seperlunya dan menggunakan sampel uji berbentuk silinder.
6. Silinder beton yang digunakan menggunakan dimensi 150mm x 300mm, dengan $f'c$: 25MPa.
7. Tipe dan diameter tulangan yang diuji adalah tulangan ulir (*ribbed bar*) dengan diameter 13mm sebagai tulangan tarik dan tulangan polos dengan diameter 6mm sebagai tulangan pengekang.
8. Pengujian *Pull-out* yang dilakukan pada umur 28 hari sebanyak 6 sampel.

9. Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil berdasarkan standar pengujian yang berlaku.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

M. Iqbal, et al., (2022) melakukan penelitian tentang “*Studi Potensi Pemanfaatan Limbah Rambut Manusia Sebagai Serat Pada Beton*”, pada penelitian ini mencoba untuk ditambahkan dengan limbah rambut manusia ke dalam campuran beton normal dari penelitian ini akan menghasilkan produk beton serat rambut manusia yang akan memiliki nilai jual agar limbah rambut manusia tidak hanya dibuang atau pun dibakar dan dapat lebih berguna dalam penggunaan beton tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kekuatan tekan dan kekuatan tarik. Berdasarkan dengan data hasil pengujian yang diperoleh pada beton normal dan beton serat limbah rambut manusia dengan perendaman air tawar 28 hari, maka peneliti dapat menyimpulkan bahwa hasil kekuatan tekan beton yang menggunakan 0%, 5%, 10%, 15% serat limbah rambut manusia berturut turut sebesar 31,39MPa; 17,39MPa; 9,33MPa; dan 7,21MPa, mengalami penurunan pada kekuatan tekan beton. Hasil kekuatan tarik belah beton yang menggunakan 0%, 5%, 10%, 15% serat limbah rambut manusia berturut-turut sebesar 2,87MPa; 3,72MPa; 2,65MPa; dan 1,91MPa, mengalami kenaikan kekuatan tarik belah pada 5% penambahan serat limbah rambut manusia. Perbandingan nilai persentasi kekuatan tekan dan tarik belah beton normal dengan beton yang menggunakan serat limbah rambut manusia 5%, 10%, dan 15% yaitu di mana beton normal bernilai 9%, sedangkan beton serat limbah rambut manusia variasi 5% bernilai 21%, variasi 10% bernilai 28%, dan variasi 15% bernilai 26%, dapat dilihat bahwa beton variasi 10% dan 15% menurun sekitar 2% karena adanya penurunan nilai kekuatan beton pada beton variasi 15%.

Kumar, et al., (2015) meneliti tentang “*An Experimental Study on Mechanical Properties of Human Hair Fibre Reinforced Concrete (M-40 Grade)*”, penelitian ini telah dilakukan untuk mempelajari pengaruh rambut manusia pada beton semen polos mutu M-40 berdasarkan sifat mekaniknya yang meliputi kekuatan tekan, kekuatan lentur dan kekuatan tarik belah serta untuk mengurangi masalah lingkungan. Percobaan dilakukan pada beton berbentuk

kubus, balok dan silinder ukuran standar dengan penambahan berbagai persentase serat rambut manusia yaitu 1%, 1,5%, 2%, 2,5% dan 3% dari berat semen dan hasilnya dibandingkan dengan beton semen biasa dengan mutu M-40. Untuk setiap persentase penambahan serat rambut manusia pada beton, enam buah kubus, tiga buah balok dan tiga buah silinder diuji sifat mekaniknya pada periode *curing* 7 hari, 14 hari dan 28 hari. Perubahan sifat mekanik beton ditentukan dan dianalisis. Dari studi eksperimental ini, ditemukan bahwa kandungan optimal serat rambut manusia yang ditambahkan ke dalam beton mutu M-40 adalah 1,5%. Diketahui bahwa telah terjadi peningkatan pada sifat-sifat beton mutu M-40 dalam hal kekuatan tekan, kekuatan lentur dan kekuatan tarik belah yang sesuai dengan persentase rambut terhadap berat semen dalam beton. Hasil pengujian menunjukkan karakteristik penting dari beton kelas M-40 dengan penambahan HHF sebagai berikut:

1. Ditemukan bahwa beton mutu M-40 dengan 1,5% serat rambut manusia menunjukkan peningkatan kekuatan tekan sebesar 7,22%, 7,21% dan 8,18% pada periode perawatan 7 hari, 14 hari dan 28 hari jika dibandingkan dengan beton semen biasa.
2. Peningkatan kekuatan lentur berada pada urutan 27,60%, 20,93% dan 23,56% untuk kondisi eksperimental yang sama pada periode perawatan 7 hari, 14 hari dan 28 hari.
3. Demikian pula dengan kekuatan tarik belah yang mencatat peningkatan sebesar 17,26%, 29,98% dan 26,60% untuk kondisi pengujian yang sama pada periode perawatan 7 hari, 14 hari dan 28 hari.

Naraindas Bheel, et al., (2020) melakukan penelitian dengan judul *“Sustainable composite development: Novel use of human hair as fiber in concrete”*, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh rambut manusia (bahan limbah) sebagai serat terhadap sifat segar, fisik dan mekanik beton dengan variasi persentase 0%, 1%, 2%, 3%, dan 4% rambut manusia terhadap volume semen. Sebanyak 180 benda uji beton (kubus, silinder, dan prisma) yang dibuat dan diawetkan pada umur 7, 28, dan 90 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tekan meningkat sebesar 8,15% pada 1% rambut manusia setelah 28 hari, sedangkan kekuatan tarik dan kekuatan lentur meningkat sebesar 21,83% dan

12,71% pada 2% rambut manusia setelah 28 hari. Juga, kepadatan beton berkurang dengan meningkatnya kandungan rambut manusia, dan penyerapan air bertambah, seiring dengan meningkatnya kandungan rambut manusia setelah 28 hari. Kemudian modulus elastisitas bertambah, karena jumlah serat rambut manusia meningkat pada beton setelah setiap periode perawatan, dan penyusutan pengeringan beton diminimalkan dengan penambahan rambut manusia sebagai serat pada beton pada umur 40 hari. Nilai slump berkurang seiring dengan bertambahnya kandungan rambut manusia.

M. Manjunatha, et al., (2021), melakukan penelitian dengan judul *“Experimental study on the use of human hair as fiber to enhance the performance of concrete: A novel use to reduce the disposal challenges”*, pada penelitian ini, penulis mencoba untuk menggunakan rambut manusia yang telah dipotong secara alami sebagai serat pada beton untuk meningkatkan kemampuan beton. Rambut manusia merupakan bahan yang tidak dapat terurai secara alami di alam. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan dosis optimum HH (*Human Hair*) sebagai serat pada beton dengan persentase yang bervariasi yaitu 0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, & 3% dari berat semen pada beton. Hasil percobaan investigasi ini menunjukkan bahwa penggunaan HH sebagai serat meningkatkan ikatan yang lebih baik antara bahan-bahan beton dengan menunjukkan peningkatan sifat hingga 2,5% dosis serat. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa 2-2,5% merupakan penggunaan optimum HH sebagai serat dalam beton. Penggunaan HH sebagai serat meningkatkan kemampuan beton dan mengurangi biaya beton serta masalah pembuangannya.

2.2 Beton dan Bahan Penyusunnya

Beton adalah bahan komposit yang bergantung pada kualitas masing-masing material yang membentuknya. Beton terbuat dari beberapa bahan utama, seperti semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan jika diperlukan untuk komposisi tertentu (Tjokrodimuljo, 2007). Beton merupakan bahan konstruksi yang biasa digunakan pada bangunan struktur. Bisa dikatakan setiap bangunan struktur dibangun menggunakan beton sebagai bahan konstruksi utama. Beberapa contoh bangunan ini termasuk gedung, bangunan air, bangunan

transportasi, dan banyak bangunan struktur lainnya. Beton memiliki banyak keuntungan termasuk kemampuan untuk menahan tekanan, perubahan cuaca, suhu yang tinggi, serta kemampuan untuk dibentuk dan dirawat dengan mudah.

Menurut (SNI 2847:2019) beton adalah hasil campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (*admixture*). Setelah melakukan analisis mix design, komposisi material beton diperoleh dengan mencampurnya secara merata hingga homogen dan kemudian dituang ke dalam pencetak. Campuran beton yang didiamkan akan menjadi keras akibat reaksi kimia antara semen dan air atau dapat juga dikatakan adukan beton akan menjadi lebih keras seiring berjalannya waktu (umur beton). Kualitas beton bergantung pada banyak faktor, termasuk bahan dasar penyusun beton, bahan tambah yang digunakan, pelaksanaan dalam pembuatan, dan peralatan yang digunakan. Jika bahan yang digunakan baik, cara pencampurannya baik (homogen), proses pelaksanaan yang dilakukan dengan baik, alat yang digunakan berkualitas tinggi, dan tingkat porositasnya kecil maka beton dapat dianggap berkualitas tinggi (Miswar Tumpu, et al., 2022).

Beton normal adalah jenis beton yang paling umum digunakan saat ini. Beton ini memiliki berat isi antara 2200 dan 2500 kg/m³ dan dibuat dari agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah. Beton normal dengan kualitas yang baik mampu menahan beban tekanan yang dipengaruhi oleh bahan pembentuk, kemudahan pengerjaan (*workability*), faktor air semen (fas), dan zat tambahan (*admixture*).

Pada dasarnya bahan utama penyusun beton meliputi air, semen portland, agregat kasar dan halus serta bahan tambah, di mana setiap bahan penyusun mempunyai fungsi dan pengaruh yang berbeda-beda. Pada penelitian ini, komposisi beton yang akan dibuat terdiri dari dua jenis perlakuan, yang pertama dibuat perancangan beton kontrol dan yang kedua adalah perancangan beton variasi dengan substitusi HHF ke dalam campuran semen.

2.2.1 Semen Portland Komposit

Berdasarkan (SNI 2049:2015), semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas

kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Walaupun semen hanya mengisi 10% volume beton, namun harus dipelajari dan dikontrol secara ilmiah sebagai bahan aktif (Tjokrodimuljo, 1996).

Unsur utama yang terdapat pada semen terbagi menjadi empat bagian yaitu trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A), dan tetrakalsium aluminoforit (C_4AF), selain itu sejumlah kecil unsur-unsur lain seperti MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O , dan Na_2O juga terdapat dalam semen. Soda atau potasium (Na_2O dan K_2O) adalah komponen minor dari unsur-unsur penyusun semen yang perlu diperhitungkan dan merupakan alkali yang dapat bereaksi dengan silika aktif dalam agregat dan menyebabkan disintegrasi beton (Neville & Brooks, 1987). Unsur C_3S dan C_2S adalah bagian terbesar (70%–80%) dan yang paling berpengaruh dalam memberikan sifat semen, bila semen terkena air maka C_3S akan segera berhidrasi dan sangat berperan pada proses pengerasan semen terutama sebelum umur 14 hari. Unsur C_2S bereaksi lambat dengan air dan baru efektif bila beton berumur 7 hari. Unsur C_3A bereaksi sangat cepat dan memberikan kekuatan setelah 24 jam, semen yang mengandung lebih dari 10% unsur C_3A memiliki ketahanan yang rendah terhadap sulfat. Karena unsur terkecil dalam semen adalah C_4AF , maka tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kekerasan pasta semen atau beton (Tjokrodimuljo, 1996).

Adapun jenis dan penggunaan semen portland menurut (SNI 2049:2015) terbagi menjadi 5 jenis, yaitu:

1. Jenis I yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
2. Jenis II yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
3. Jenis III semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
4. Jenis IV yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.

5. Jenis V yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

2.2.2 Agregat

Menurut (SNI 2847:2019), agregat adalah bahan berbutir, seperti pasir, kerikil, batu pecah, dan slag tanur (*blast-furnace slag*), yang digunakan dengan media perekat untuk menghasilkan beton atau mortar semen hidrolis. Fungsi agregat di dalam beton adalah untuk menghemat penggunaan semen portland, menghasilkan kekuatan yang besar pada beton, mengurangi penyusutan pada beton, menghasilkan beton yang padat bila gradasinya baik. Agregat adalah butiran mineral alami yang digunakan sebagai pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat menempati sekitar 70% dari volume mortar atau beton. Pemilihan agregat sangat penting karena karakteristik agregat sangat mempengaruhi sifat mortar atau beton (Tjokrodimuljo, 1996).

Faktor lain yang perlu diperhatikan adalah gradasi atau distribusi ukuran butir agregat, karena bila butir-butir agregat mempunyai ukuran yang seragam berakibat volume pori lebih besar tetapi bila ukuran butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini disebabkan butir yang lebih kecil akan mengisi pori di antara butiran yang lebih besar. Secara umum agregat dapat dibedakan menurut ukurannya yaitu agregat kasar dan agregat halus.

1. Agregat Kasar

Berdasarkan (SNI 1969-2016), agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75mm sampai 40mm. Sifat terpenting dari agregat kasar adalah ketahanan terhadap benturan yang mempengaruhi ikatannya dengan pasta semen, porositas, dan sifat penyerapan air mempengaruhi daya tahannya terhadap pembekuan musim dingin dan agresi kimia, serta ketahanan terhadap penyusutan.

Agregat kasar harus mempunyai gradasi yang baik, artinya ukuran butirnya beragam, sehingga dapat mengisi rongga-rongga yang terdapat di dalam beton. Adapun susunan butiran agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Susunan Butiran Agregat Kasar

Ukuran mata ayakan	Persentase berat bagian yang lewat ayakan		
(mm)	Ukuran nominal agregat (mm)		
	38-4,76	19,0-4,76	9,6-4,76
38,1	95-100	100	
19,0	37-70	95-100	100
9,52	10-40	30-60	50-85
4,76	0-5	0-10	0-10

Sumber: SNI 2834-2000

Di dalam SNI 2847-2019 (Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung) ukuran maksimum agregat kasar harus tidak melebihi:

- 1). 1/5 jarak terkecil antara sisi cetakan, ataupun
- 2). 1/3 ketebalan slab, ataupun
- 3). $\frac{3}{4}$ jarak bersih minimum antara tulangan atau kawat, bundel tulangan, atau tendon prategang, atau selongsong.

2. Agregat Halus

Berdasarkan (SNI 1970-2016), agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi secara alami dari batu atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (No. 4). Dijelaskan pula distribusi ukuran butiran agregat halus diklasifikasikan menjadi empat daerah atau zone yaitu: zona I (kasar), zona II (agak kasar), zona III (agak halus) dan zona IV (halus) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Batas-Batas Gradasi Agregat Halus

No saringan	Ukuran saringan (mm)	Presentase Berat yang lolos saringan (%)			
		Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
3/8"	9,6	100	100	100	100
No.4	4,8	90-100	90-100	90-100	90-100
No.8	2,4	60-95	75-100	85-100	95-100
No.16	1,2	30-70	55-90	75-100	90-100
No.30	0,6	15-34	35-59	60-79	80-100
No.50	0,3	0-20	8-30	12-40	15-50
No.100	0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber: SNI 2834-2000

Adapun persyaratan agregat halus yang digunakan menurut PBI 1971 adalah sebagai berikut:

- 1). Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu.
- 2). Agregat halus berbentuk butiran-butiran yang tajam dan keras, serta bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- 3). Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% terhadap berat agregat kering. Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0.063 mm. Apabila mengandung lumpur lebih dari 5%, agregat halus harus dicuci terlebih dahulu.
- 4). Agregat halus tidak boleh mengandung bahan-bahan organik terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrams-Harder (dengan larutan NaOH).
- 5). Agregat halus terdiri dari butiran-butiran yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan, harus memenuhi syarat sebagai berikut:
 - Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat;
 - Sisa di atas ayakan 1 mm, harus minimum 10% berat;
 - Sisa di atas ayakan 0,25 mm, harus berkisar antara 80% - 90% berat.

2.2.3 Air

Air adalah bahan penyusun beton yang digunakan untuk bereaksi dengan semen dan sebagai pelumas antara butiran-butiran agregat agar dapat dikerjakan dan dipadatkan. Fungsi air pada campuran beton adalah untuk memicu proses kimiawi semen sebagai perekat dan melumasi agregat untuk memudahkan pekerjaan. Kualitas air yang digunakan untuk mencampur beton sangat memengaruhi kualitas beton itu sendiri. Air yang mengandung zat kimia berbahaya seperti asam, minyak, dll akan mengurangi kekuatan beton. Secara umum, air minum dapat digunakan sebagai bahan campuran beton (Riyadi & Amalia, 2005).

Pasta semen adalah hasil reaksi kimia antara semen dan air. Jika air terlalu banyak maka akan timbul gelembung-gelembung lagi setelah proses hidrasi selesai, dan jika air terlalu sedikit maka proses hidrasi tidak akan selesai sehingga akan mempengaruhi kekuatan beton. Untuk air yang tidak memenuhi syarat mutu 90 % jika dibandingkan dengan kekuatan beton yang menggunakan air standar atau suling (SNI 7974:2013). Menurut (Tjokrodimuljo, 1996), air diperlukan untuk pembentukan semen yang mempengaruhi sifat kemudahan pengerjaan campuran beton (*workability*), kekuatan, susut, dan keawetan beton., kekuatan, susut dan keawetan beton. Air yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen hanya sekitar 25% dari berat semen saja, namun dalam kenyataannya nilai faktor air semen yang dipakai sulit jika kurang dari 0,35.

Pemakaian air untuk campuran beton sebaiknya memenuhi persyaratan sebagai berikut (Tjokrodimuljo, 2007):

1. Tidak mengandung lumpur atau benda melayang lainnya lebih dari 2 gram/liter.
2. Kandungan garam yang dapat merusak beton (diantaranya asam, zat organik dan sebagainya) tidak lebih dari 15 gram/liter.
3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
4. Kandungan senyawa sulfatnya tidak lebih dari 1 gram/liter.

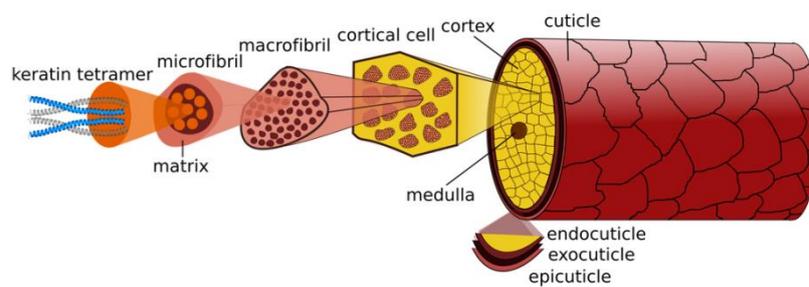
2.2.4 Human Hair Fiber

Beton *fiber* adalah campuran beton dengan *fiber*, biasanya berbentuk batang dengan ukuran antara 5-500 μm dan panjang sekitar 25 mm. Bahan seratnya dapat berupa serat asbes, serat plastik (*polypropylene*) atau potongan kawat baja. Kelemahannya adalah sulit dalam pengerjaannya, namun juga memiliki kelebihan seperti potensi segregasi yang rendah, daktail, dan ketahanan terhadap benturan (Mulyono, 2005). Banyak sifat-sifat beton yang dapat diperbaiki dengan penambahan serat, diantaranya adalah meningkatnya daktilitas, ketahanan *impact*, kekuatan tarik dan lentur, ketahanan terhadap kelelahan, ketahanan terhadap pengaruh susutan, ketahanan abrasi, ketahanan terhadap pecahan atau fragmentasi, dan ketahanan terhadap pengelupasan (Huseiny & Nursani, 2020).

Serat merupakan bahan tambah yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat beton. Berbagai jenis serat yang dapat digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat mekanik beton antara lain adalah serat baja (*steel fiber*), serat *polypropylene* (sejenis plastik mutu tinggi), serat kaca (*glass fiber*), serat karbon (*carbon fiber*), dan serat yang terbuat dari bahan alami (*natural fiber*), seperti ijuk, **rambut**, sabut kelapa, serat goni dan serat tumbuh-tumbuhan. Serat alami sebagai salah satu opsi perkuatan yang dapat digunakan untuk beton dewasa ini dikembangkan semakin luas dalam bidang struktur. Penggunaan serat alami semakin meluas karena ketersediaannya di alam yang melimpah (*renewable resource*) (Huseiny & Nursani, 2020).

Rambut merupakan suatu struktur kompleks dari sel-sel epitel berkeratin berperan sebagai pelindung kulit kepala yang paling efektif terhadap paparan sinar matahari (Bilkes Harris, 2021). Rambut adalah bagian tubuh yang berfungsi untuk melindungi dan menambah penampilan (Yang Yu, 2017). Komponen rambut terdiri dari 70-80% keratin, 3-6% senyawa minyak, 1% pigmen melanin dan pheomelanin, 15% air, dan sisanya karbohidrat dan mineral (Zainal Akhmadi, 2017). Rambut manusia tumbuh sekitar 1-1,5cm setiap bulannya, sehingga kebanyakan orang pergi ke salon untuk memotong rambutnya. Terlepas dari gender, ada keinginan dan ketidakpuasan terhadap rambut, terutama di kalangan wanita (J. Kishimoto, 2017).

Rambut memiliki struktur silinder yang sangat terorganisir dan dibentuk oleh sel-sel inert keratin. Dalam kaitannya dengan komponen dasar, rata-rata, rambut terdiri dari 20,85% oksigen, 50,65% karbon, 17,14% nitrogen, 5,0% sulfur, dan 6,36% hidrogen. Keratin memberikan kelenturan, kekuatan, dan daya tahan pada rambut. Keratin korteks berperan dalam sifat ini dan rangkaian panjangnya dipadatkan untuk membentuk struktur yang rata, yang juga kuat dan fleksibel. Dan sifat fisik rambut mencakup elastisitas, ketahanan terhadap regangan, dan daya hidrofilik. Ketahanan terhadap kerusakan adalah peran dari ketebalan benang, yaitu kondisi korteks. Benang rambut memiliki karakteristik elastis, dan dapat mengalami peregangan yang cukup baik dalam keadaan kering maupun basah. Saat kering, benang rambut dapat meregang 20-30% dari panjangnya dan jika terkena air, bisa mencapai 50% (Kumar, et al., 2023).



Gambar 1. Skema Penampang Melintang dari Serat Rambut

(Sumber: Cruz, et al., 2016)

Menurut (Kumar, et al., 2023) rambut digunakan sebagai serat penguat pada beton karena beberapa alasan berikut:

1. Kekuatan tarik tinggi: Rambut menunjukkan kekuatan tarik yang relatif tinggi, dapat dibandingkan dengan kawat tembaga dengan diameter yang sama. Sifat ini membuatnya cocok untuk memperkuat beton dan meningkatkan ketahanannya terhadap keretakan dan kekuatan struktural.
2. Keberlanjutan lingkungan: Rambut adalah bahan yang tidak dapat terurai dan menjadi tantangan dalam hal pengelolaan limbah. Dengan menggunakan rambut sebagai tulangan berserat pada beton, akan memberikan tujuan ganda yaitu meminimalisir masalah lingkungan yang terkait dengan pembuangan rambut dan memanfaatkannya sebagai bahan konstruksi yang berkelanjutan.
3. Ketersediaan yang melimpah dan efektivitas biaya: Rambut tersedia dalam jumlah yang melimpah, sehingga menjadi pilihan yang ekonomis untuk tulangan serat pada beton. Ketersediaannya dalam jumlah besar berkontribusi pada keterjangkauan dan aksesibilitas rambut sebagai bahan penguat.
4. Penguatan Mortar dan Pencegahan Retak: Ketika rambut dimasukkan ke dalam beton, rambut memperkuat fraksi mortar, meningkatkan sifat mekaniknya. Selain itu, rambut membantu mencegah perambatan retakan di dalam matriks beton, sehingga meningkatkan daya tahan dan kinerjanya.

Pemanfaatan rambut sebagai tulangan serat pada beton memberikan peluang untuk mengatasi masalah lingkungan, memanfaatkan sifat mekaniknya, dan memberikan solusi yang hemat biaya untuk meningkatkan kinerja beton.

Adapun langkah-langkah untuk mempersiapkan rambut yang akan digunakan dalam beton adalah sebagai berikut (Kumar, et al., 2023):

1. Pemisahan: Rambut yang dikumpulkan dari salon, barber shop, dan pangkas rambut harus dipisahkan dari bahan limbah yang ikut terbawa. Hal ini untuk memastikan bahwa hanya rambut bersih yang digunakan dalam campuran beton.
2. Pencucian: Setelah dipisahkan, rambut harus dicuci bersih sebanyak dua kali menggunakan sampo untuk menghilangkan kotoran.
3. Pengeringan: Setelah dicuci, rambut dikeringkan di bawah sinar matahari atau dengan cara lain yang dapat digunakan. Langkah ini memastikan bahwa rambut benar-benar kering dan bebas dari kelembaban. Pengeringan yang tepat mencegah masalah bau atau pembusukan dan memastikan tempat penyimpanan aman.
4. Penyortiran: Rambut yang sudah kering kemudian disortir berdasarkan kualitas, warna, dan panjangnya. Langkah ini memastikan bahwa serat rambut yang digunakan dalam campuran beton memenuhi spesifikasi yang diinginkan.



(a)



(b)



(c)



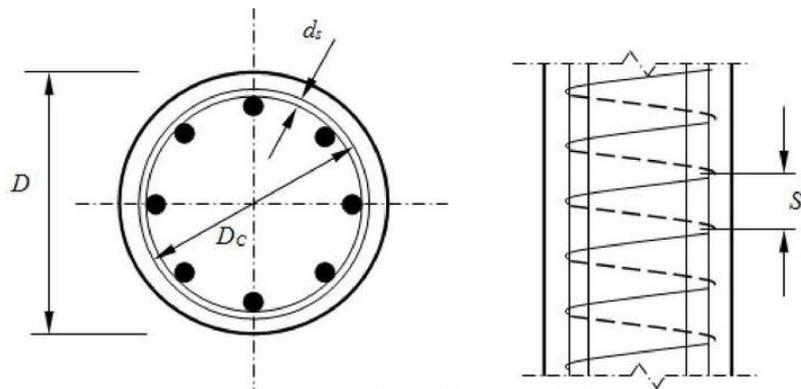
Gambar 2. Pengolahan limbah rambut (a. Pencarian limbah rambut; b. Pengumpulan limbah rambut; c. Proses pemisahan limbah rambut dari kotoran; d. Proses pencucian limbah rambut; e. Proses pengeringan dan penyortiran rambut)

Sumber: (Sheren Viola dkk, 2024)

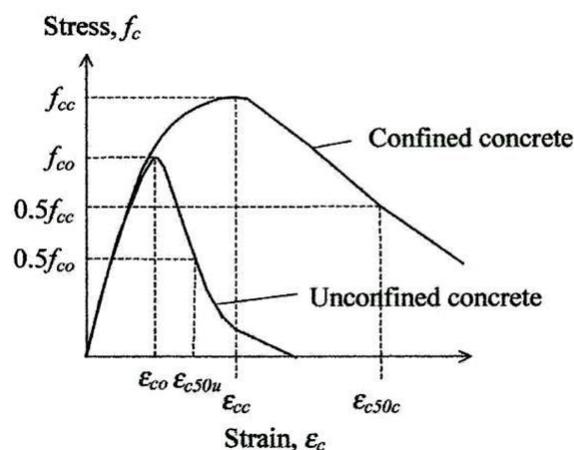
Dengan mengikuti langkah-langkah di atas, serat rambut dapat dipersiapkan dan diperlakukan dengan benar sebelum dimasukkan ke dalam campuran beton. Proses persiapan ini membantu memastikan kualitas dan keefektifan serat rambut sebagai bahan penguat dalam campuran beton.

2.3 Pengekangan Tulangan Spiral

Beton bertulang sebagai elemen balok harus diberi tulangan yang berupa tulangan lentur dan tulangan geser/sengkan (Imran, et al., 2018). Tulangan melingkar/spiral juga merupakan jenis tulangan geser. Pengekangan dengan menggunakan tulangan spiral efektif meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton (Tjitradi, 2008). *Spalling* yang tidak wajar dan gaya lateral seperti gaya gempa secara tiba-tiba akan terjadi pada beton yang tidak berada dalam efek kekangan dari tulangan spiral. Oleh karena itu, spasi/jarak dan ukuran tulangan spiral dirancang untuk mempertahankan beban selain beban kolom sendiri. Jarak antara tulangan spiral berkisar antara 1-3 inchi (25,2-76,2 mm) (Edward G. Nawy, 1998) seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tulangan Spiral pada Kolom

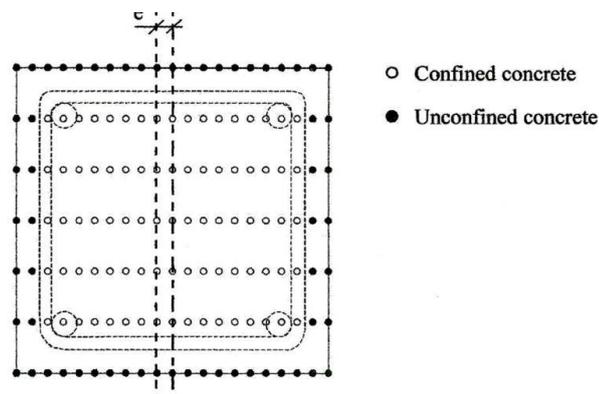


Gambar 4 Kurva tegangan dan regangan pada beton terkurung (*confined concrete*) dan beton tidak terkurung (*unconfined concrete*)
(Sumber: Christina Claeson Research Assistant, M.Sc, 2010)

Efek *confinement* pada beton tergantung pada dua faktor yaitu: kecenderungan beton untuk memuai dan kekakuan lateral beton dengan tulangan sengkang untuk menahan pemuaian beton. Dengan adanya efek *confinement* maka daktalitas pada beton akan meningkat, dasar pendekatan ini adalah peningkatan dan penambahan daktalitas pada beton yang terkekang disebabkan karena energi yang tersimpan pada tulangan pengekat. Hubungan tegangan dan regangan antara beton terkurung (*confined concrete*) dan beton tidak terkurung (*unconfined concrete*) ditunjukkan pada Gambar 4 di atas. Dari gambar grafik yang dikutip melalui Christina Claeson Research Assistant, M.Sc 2010 menerangkan bahwa beton yang terkurung (*confined concrete*) mempunyai kekuatan tekan ($f'c$) dan regangan (ϵ) yang lebih baik dibandingkan beton yang

tidak terkurung (*unconfined concrete*). Kurva ini digunakan karena beton yang terkurung oleh sengkang akan memiliki kekuatan tekan yang tinggi dan kerusakan yang lebih daktail. Karena semakin rapat sengkang, semakin tinggi kekuatan tekannya. Hal ini terjadi karena baja tulangan sengkang juga mampu menahan beban vertikal.

Dan Gambar 5 di bawah dapat dijelaskan bahwa kekuatan tekan pada beton yang di dalam sengkang lebih besar dibandingkan dengan kekuatan tekan beton yang berada di luar sengkang.

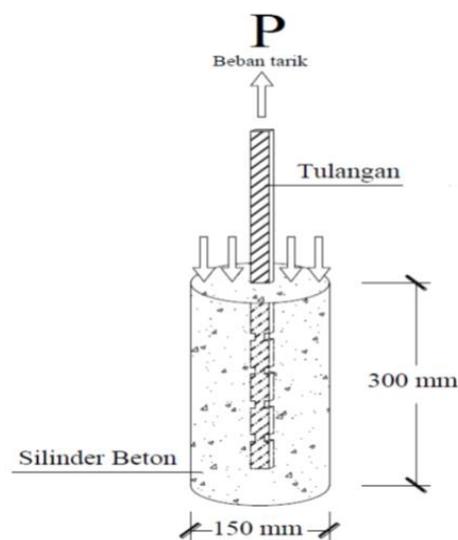


Gambar 5. Gaya tekan antara beton di dalam sengkang dan beton di luar sengkang
(Sumber: Christina Claeson Research Assistant, M.Sc, 2010)

2.4 Pengujian *Pull-Out*

Pengujian *pull-out* bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan lekat (*bond stress*) dan *interlocking* pada angkur mekanis yang selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk membandingkan kekuatan berdasarkan metode pemasangan angkur (Wiguntoro & Henry A., 2020). Pengujian *pull-out* dilakukan setelah umur beton 28 hari dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) yang dimodifikasi dengan menambahkan batang besi dengan dua titik tumpuan dipinggir dan satu ditengah sebagai penahan benda uji saat tulangan tertarik (Anjani & Walujodjati, 2022). Pengujian ini menghasilkan suatu beban maksimum yang digunakan untuk menghitung tegangan lekatan antara beton dengan tulangan. Pengujian *pull-out* memberikan perbedaan yang baik antara efisiensi lekatan berbagai jenis permukaan tulangan dan panjang penanamannya (*embedment length*). Namun hasilnya belum memberikan tegangan lekatan

sesungguhnya pada struktur rangka. Suatu batang ditanamkan dalam sebuah silinder beton dan gaya tarik sebesar P diberikan pada tulangan sehingga tercabut dan mengalami gaya geser antara permukaan tulangan dan beton. Gaya ini selanjutnya akan ditahan antara tulangan dengan beton di sekelilingnya. Tegangan lekat bekerja sepanjang tulangan yang tertanam di dalam massa beton, sehingga total gaya yang harus dilawan sebelum tulangan tercabut keluar dari massa beton adalah sebanding dengan luas selimut baja tulangan yang tertanam dikalikan dengan kekuatan lekat antara beton dengan baja tulangan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6 di bawah ini.



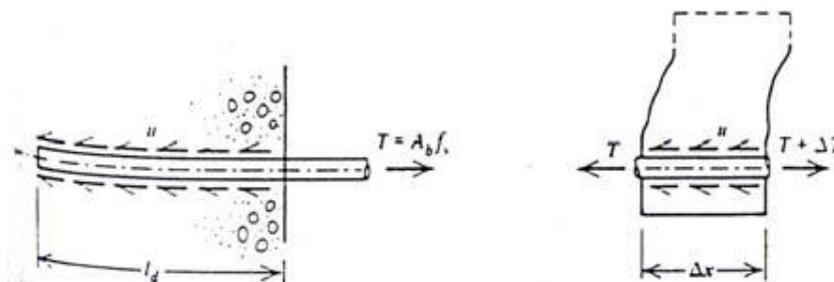
Gambar 6. Pengujian Pull Out

2.5 Lekatan antara Beton dan Tulangan

Kemampuan antara tulangan dan beton untuk menahan gaya yang dapat menyebabkan lekatan antara tulangan dan beton terlepas disebut kuat lekat (Winter & Nilon, 1993). Menurut (Edward G. Nawy, 1998), kuat lekat antara tulangan dan beton dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti lekatan beton dengan permukaan tulangan baja dan tekanan beton terhadap tulangan karena susut pengeringan pada beton. Gesekan antara tulangan baja dan beton juga meningkatkan tahanan terhadap gelincir. Efek keseluruhan ini dikenal sebagai lekatan (*bond*), lekatan disini adalah hubungan kerja sama antara baja tulangan dengan beton di sekelilingnya. Agar beton bertulang dapat berfungsi dengan baik

sebagai bahan komposit, di mana batang baja tulangan saling bekerja sama sepenuhnya dengan beton. Untuk menjamin hal ini diperlukan adanya lekatan yang baik antara beton dengan tulangan dan pada akhirnya akan menghindarkan dari terjadinya *slip* antara tulangan dengan beton di sekelilingnya.

Tulangan ulir dapat meningkatkan kekuatan lekatan yang disebabkan oleh terjadinya keterpautan (*interlocking*) antara tonjolan (*rib*) dengan beton di sekelilingnya. Tegangan lekatan (*Bond stress*) adalah tegangan geser pada permukaan beton, tempat terjadinya transfer beban antara baja tulangan dan beton di sekelilingnya sehingga memodifikasi tegangan baja tulangan (Park & Paulay, 1975). Lekatan ini disalurkan secara efektif, dan memungkinkan dua buah material membentuk sebuah struktur komposit, seperti tampak pada Gambar 7 yang menggambarkan perilaku lekatan sepanjang tulangan.



Gambar 7. Pengangkutan dan Lekatan Lentur Tulangan Tarik

(Sumber: Park & Paulay, 1975)

Menurut (Edward G. Nawy, 1998), kuat lekat tulangan dengan beton tergantung pada faktor-faktor utama sebagai berikut:

1. Adhesi antara unsur penyusun beton dan bahan penguatnya (tulangan). Dimana adhesi ini adalah gaya tarik-menarik (ikatan kimiawi) yang terbentuk pada seluruh bidang kontak antara beton dan tulangan akibat adanya proses reaksi pergeseran semen.
2. Efek *gripping* (memegang) sebagai akibat dari susut pengeringan beton di sekeliling tulangan
3. Tahanan gesekan (friksi) terhadap gelincir dan saling mengunci pada saat tulangan mengalami tegangan tarik. Mekanisme ini terbentuk karena adanya

permukaan yang tidak beraturan pada bidang kontak antara tulangan dengan beton.

4. Efek kualitas beton (kekuatan tarik dan tekannya). Akibat desakan oleh tegangan radial, beton mengalami tegangan tarik keliling, jika tegangan tarik beton terlampaui maka akan terjadi retak belah.
5. Efek mekanis penjangkaran ujung tulangan yaitu dengan panjang penyaluran (*development length*), panjang lewatan (*splicing*), bengkokan tulangan (*hooks*) dan persilangan tulangan.
6. Diameter, bentuk, dan jarak tulangan karena semuanya mempengaruhi pertumbuhan retak.

Kuat lekat antara beton dan baja tulangan akan berkurang apabila mendapat tegangan yang tinggi karena terjadi retakan pada beton. Apabila hal ini terus berlanjut maka retakan yang terjadi pada beton menjadi lebih lebar dan biasanya bersamaan dengan itu akan terjadi defleksi pada balok. Dalam hal ini fungsi dari beton bertulang menjadi hilang karena baja tulangan telah terlepas dari beton. Meskipun demikian, penggelinciran yang terjadi antara baja tulangan dan beton di sekelilingnya kadang tidak mengakibatkan keruntuhan balok secara menyeluruh. Hal ini disebabkan karena ujung-ujung baja tulangan masih berjangkar dengan kuat, sekalipun telah terjadi pemisahan di seluruh batang baja tulangan.

Untuk menjamin lekatan antara baja tulangan dan beton tidak mengalami kegagalan, diperlukan adanya syarat panjang penyaluran. Agar terjadi keseimbangan antara gaya horisontal, maka beban (N) yang dapat ditahan sama dengan luas penampang baja dikalikan dengan kuat lekatnya.

$$P = l_d \pi D \tau \quad (1)$$

Dengan mendistribusikan nilai $P = f_s Ab$ maka didapat persamaan:

$$Ab f_s = l_d \pi D \tau \quad (2)$$

Agar terjadi keseimbangan maka pada perencanaan selalu bertujuan dicapainya tegangan leleh (f_y) pada baja. Oleh karena itu f_s dalam persamaan (2) diubah menjadi f_y .

$$Ab f_y = l_d \pi D \tau \quad (3)$$

Kemudian dengan mengganti nilai A_b dengan $\pi d^2/4$ (untuk satu batang bulat) didapat panjang penyaluran (l_d):

$$l_d = \frac{f_y D}{4 \tau} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{P}{\pi D l_d} \quad (5)$$

dengan:

P = Beban (N)

A_b = Luas baja tulangan (mm^2)

f_y = Tegangan baja leleh (MPa)

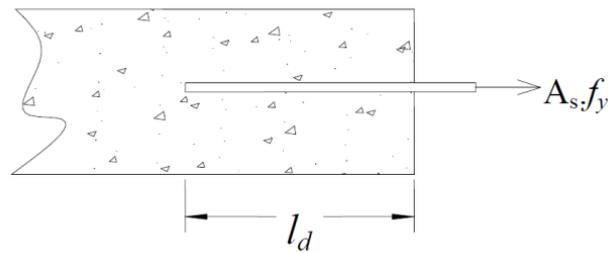
D = Diameter baja tulangan (mm)

l_d = Panjang penyaluran (mm)

τ = Tegangan lekat (MPa)

2.6 Panjang Penyaluran Dasar l_d

Panjang tulangan yang tertanam di dalam beton yang menjamin tulangan tertarik tepat pada tegangan elastis, mencapai tegangan leleh (f_y) dan tegangan putus (f_u) disebut panjang penyaluran (l_d) (Rosyidah, et al., 2011). Panjang penyaluran dibutuhkan karena adanya kecenderungan batang dengan tegangan yang sangat besar dapat membelah bagian yang tipis beton pembungkus. Sebuah tulangan tunggal pada beton masif seharusnya tidak membutuhkan panjang penyaluran yang besar karena kecenderungan batang dengan tegangan yang tinggi dapat membelah bagian tipis beton pembungkus. Namun, sebaris tulangan, bahkan di dalam beton masif, dapat menyebabkan perlemahan bidang dengan pembelahan (*splitting*) beton arah longitudinal di sepanjang bidang tulangan. Panjang penyaluran dasar l_d merupakan fungsi dari ukuran (dimensi) dan tegangan leleh tulangan yang sangat menentukan ketahanan tulangan untuk terjadinya *slip*. Jarak l_d dibutuhkan untuk menyalurkan gaya tulangan kepada beton melalui lekatan. Kuat lekat beton τ adalah suatu fungsi dari kekuatan tekan beton (Trisnawathy & Anton, 2022). Adapun model penanaman tulangan dalam beton tampak seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Panjang Tulangan (l_d) yang Tertanam dalam Beton

(Sumber: Rosyidah, et al., 2011)

Dasar utama teori panjang penyaluran adalah dengan memperhitungkan suatu baja tulangan yang ditanam di dalam beton. Agar batang dapat menyalurkan gaya sepenuhnya melalui ikatan, maka batang harus tertanam di dalam beton hingga suatu kedalaman tertentu yang dinyatakan dengan panjang penyaluran. Sebuah gaya tarik bekerja pada baja tulangan tersebut. Gaya ini ditahan oleh lekatan antara beton sekeliling dengan tulangan. Bila tegangan lekat ini bekerja merata pada seluruh bagian batang yang tertanam, total gaya yang harus dilawan sebelum batang tersebut keluar dari beton akan sama dengan panjang bagian yang tertanam dikalikan keliling baja tulangan kali tegangan lekat (Emillianto, 2008).

Untuk menghitung besar panjang tulangan yang tertanam dalam beton diperlukan adanya nilai tegangan lekat (τ). Hal ini menunjukkan adanya hubungan yang erat antara tegangan lekat dengan panjang tulangan yang tertanam dalam beton (Park & Paulay, 1975). Sehingga panjang penyaluran dasar l_d dapat dirumuskan seperti pada persamaan (6) sebagai berikut:

$$l_d = k \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} A_b \quad (6)$$

Dimana:

l_d = Panjang penyaluran l_d (mm)

f_y = Tegangan leleh tulangan (MPa)

f'_c = kekuatan tekan beton (MPa)

A_b = Luas tulangan (mm²)

k = Koefisien hubungan antara kekuatan lekat dengan kekuatan tekan beton

Dimana nilai k dihitung dengan persamaan (7) yaitu:

$$k = \frac{\sqrt{f'c}}{\pi D \tau} \quad (7)$$

Dimana :

- τ = Tegangan lekat (Mpa)
- D = Diameter tulangan (mm)

Berdasarkan (SNI 2847-2019), konsep panjang penyaluran membutuhkan panjang penyaluran atau perpanjangan tulangan minimum melebihi keseluruhan titik tegangan puncak pada tulangan.

- a Tarik atau tekan dihitung pada penulangan disetiap penampang komponen struktur harus disalurkan pada setiap sisinya dengan panjang penyaluran, kait, batang ulir berkepala, sambungan mekanik, atau kombinasinya.
- b Kait dan kepala tulangan tidak boleh digunakan untuk menyalurkan tekan
- c Panjang penyaluran tidak memerlukan faktor reduksi ϕ
- d Nilai $\sqrt{F'c'}$ yang digunakan untuk menghitung panjang penyaluran tidak boleh lebih dari 8,3 MPa.

2.7 Tipe Keruntuhan

Keruntuhan lekatan antara baja tulangan dan beton yang mungkin terjadi pada saat dilakukan pengujian biasanya ditunjukkan oleh salah satu atau lebih dari peristiwa berikut ini (Nuryani TA, 2005:12):

1. *Transverse Failure* yaitu adanya retak pada beton arah *transversal*/melintang akibat tegangan tarik yang tidak dapat ditahan oleh selimut beton, keruntuhan ini akan menurunkan tegangan lekat antara baja tulangan dan beton.
2. *Splitting Failure* yaitu adanya retak pada beton arah *longitudinal*/memanjang akibat tegangan radial geser yang tidak dapat ditahan oleh selimut beton, keruntuhan ini akan menurunkan tegangan lekat antara baja tulangan dan beton.
3. *Pull Out Failure/Slip* yaitu kondisi di mana baja tulangan tercabut dari beton tanpa mengalami retak yang diakibatkan komponen tegangan geser yang memecah lekatan antara baja tulangan dan beton.

4. Baja tulangan mencapai leleh yaitu apabila baja tulangan meleleh diikuti oleh kontraksi/pengecilan diameter tulangan, hal ini mengakibatkan tidak berfungsinya lekatan terhadap beton yang mengelilinginya, sehingga akan menurunkan atau bahkan hilangnya daya lekatan antara baja tulangan dan beton.
5. Putusnya tulangan apabila penanamannya terlalu panjang.