

TESIS

**PENGARUH TULANGAN PENGEKANG PADA LEKATAN
BETON BERTULANG DENGAN VARIASI *GLASS POWDER*
SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN**

*The Effect Of Confinement on Bond Behavior in Reinforced
Concrete with Glass Powder Variations as a Cement Substitution*

DWI NURUL ILMIH AHKAM

D012221041



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

**PENGARUH TULANGAN PENGEKANG PADA LEKATAN
BETON BERTULANG DENGAN VARIASI *GLASS POWDER*
SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

DWI NURUL ILMIH AHKAM
D012221041

Kepada

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

TESIS

PENGARUH TULANGAN PENGEKANG PADA LEKATAN BETON BERTULANG DENGAN VARIASI *GLASS POWDER* SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN

DWI NURUL ILMIH AHKAM

D012221041

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 13 Mei 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. A. Arwin Amirudin, S.T., M.T.
NIP. 97912262005011001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M.Eng
NIP. 196207291987031001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng.Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT.IPM
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr.Ir.M.Asad Abdurrahman, ST. M.Eng.PM,IPM
NIP. 197303061998021001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dwi Nurul Ilmih Ahkam
Nomor Mahasiswa : D01221041
Program Studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Pengaruh Tulangan Pengekang pada Lekatan Beton Bertulang dengan Variasi *Glass Powder* sebagai Substitusi Semen” adalah benar karya saya dengan arahan kompi pembimbing (Dr. Eng. Ir.A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T. sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ing. Herman Parung, M. Eng.sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Prosiding Internasional bereputasi Scopus “*International Symposium Infrastructured Development (ISID) 2023* sebagai artikel dengan judul “*Mechanical Properties of Concrete Incorporating Glass Powder (Bottle Waste) as Cement Replacement*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin

Gowa, 14 Mei 2024

Yang Menyatakan



Dwi Nurul Ilmih Ahkam

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT sebagai Tuhan yang Maha Esa, karena dengan Rahmat dan hidaya-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan naskah tesis dengan judul “ **Pengaruh Tulangan Pengekang Pada Lekatan Beton Bertulang Dengan Variasi Glass Powder Sebagai Substitusi Semen**” dengan baik dan berjalan lancar. Penelitian dan penyusunan tesis ini merupakan salah satu persyaratan mutlak yang harus penulis penuhi untuk menyelesaikan pendidikan program studi magiste Teknik Sipil di Fakultas Teknik Univeristas Hasanuddin Makassar.

Penulis menyadari sepenuhnya dalam penelitian dan penulisan naskah tesis ini tidak akan terlaksana sebagaimana yang diharapkan tanpa adanya bantuan, arahan, dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini perkenankan penulis dengan segala kerendahan hati ingin menyapaikan menghaturkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda Ir. Ahkam Friday dan ibunda Ir. Nur Falah Nun atas doa, bantuan, kasih saying dan segala dukungan selama ini baik spiritual maupun material,
2. **Bapak Prof. DR. Eng. M. Isran Ramli, S.T., M.T.** Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Prof. DR. Eng. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng.** Selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Univeristas Hasanuddin.
4. **Bapak DR. Muhammad Asad Abdulrahman, S.T., M.Eng., PM.** Selaku ketua Program Studi Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. **Bapak DR. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T.** Selaku dosen pembimbing pertama yang berkenan memberikan tambahan ilmu, Solusi dan advice pada setiap permasalahan atas kesulitan dalam penyusunan naskah tesis ini.
6. **Bapak Prof. DR. Ing. Ir. Herman Parung, S.T., M.Eng.** Selaku dosen pembimbing kedua yang berkenan memberikan tambahan ilmu dan solusi pada setiap permasalahan atas kesulitan dalam penyusunan naskah tesis ini.

7. Para dosen penguji **Bapak Prof. DR. Eng. H. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng. Bapak DR. Eng. Akbar Caronge, S.T., M.T., Bapak DR. Eng. Fakhrudin, S.T., M.Eng.** yang sejak awal dengan sangat cermat memberikan saran, sanggahan dan kritik demi kesempurnaan pelaksanaan penelitian dan penyusunan naskah tesis ini.
8. Seluruh staf dan dosen pengajar Fakultas Teknik terkhusus Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, atas ilmu pengetahuan dan didikan yang diberikan kepada pebulis selama menempuh studi di Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.
9. Kakak dan Adik saya tercinta drg. Zahrawie Astrie Ahkam, M.Kes dan Nani Chaerani yang selalu menaruh atensi dan mendukung dalam setiap keputusan.
10. Dosen saya selama menempuh Strata 1, Bapak Prof. Ir. Mochamad Teguh, MSCE., Ph.D dan Bapak Prof. Ir. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U. yang selalu memberikan arahan, motivasi untuk melanjutkan pendidikan Strata 2.
11. Saudara Haslinda, S.T., M.T., Muh. Shadikin Ismail, S.T.,M.T dan Muhammad Athar Al-Ayubi, S.T., M.T. sebagai rekan saya dalam kegiatan penelitian di tim S2 Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin.
12. Teman-teman Laboratorium Riset Gempa dan Rekayasa Struktur Angkatan 2019 yang telah membantu dalam proses penelitian Yana, Ricky, Valdo, Cindy, Angi, Lisa, Riski, Didik dan Hikmah.
13. Seluruh teman-teman program studi Teknik Sipil Angkatan 2022 gelombang pertama saya ucapkan terima kasih atas kebersamaannya selama dibangu kuliah.

Semoga Allah SWT sebagai Tuhan Yang Maha Esa, membalas segala kebaikan pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan naskah tesis ini. Akhir kata, penulis mengharapkan tesis ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan, teknologi dan peradaban ummat manusia. Terimakasih.

Makassar, 14 Mei 2024
Penulis

Dwi Nurul Ilmih Ahkam

ABSTRAK

DWI NURUL ILMIH AHKAM. Pengaruh Tulangan Pengekang Pada Lekatan Beton Bertulang Dengan Variasi *Glass Powder* Sebagai Substitusi Semen (dibimbing oleh **Andi Arwin Amiruddin, Herman Parung**)

Pengembangan beton dengan *glass powder* sebagai pengganti semen saat ini merupakan bahan penelitian yang ekstensif ditunjukkan dengan dapat menambah kekuatan pada beton. Limbah kaca adalah salah satu material yang dapat didaur ulang sebagai pengganti bahan semen tambahan (*Supplementary Cementitious Materials*) pada campuran beton. Substitusi serbuk kaca pada semen tentu akan mempengaruhi daya lekatan yang terjadi antara baja tulangan dengan beton dalam menahan beban yang bekerja, terutama gaya aksial yang bersifat tarik sehingga karakteristik lekatan antara baja tulangan dengan beton substitusi *glass powder* adalah parameter yang kritis untuk diteliti.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku lekatan beton dengan variasi *glass powder* sebagai substitusi semen terhadap baja tulangan tanpa tulangan spiral dan dengan tulangan spiral. Metode yang digunakan adalah pengujian karakteristik dan pengujian *pull-out* tulangan baja yang ditanam pada silinder beton dimensi 150x300mm sejumlah 24 buah dengan mutu beton 21MPa dan mutu baja 400MPa mengacu pada standar ASTM C234. Pengujian menggunakan alat *Universal Testing Machine* kapasitas 1000kN dengan variasi substitusi serbuk kaca yaitu 15%, 20% dan 25% dengan dan tanpa tulangan spiral.

Nilai tegangan lekat menurun seiring dengan peningkatan penggunaan *glass powder* sebagai substitusi semen dalam campuran beton baik pada sampel tanpa tulangan spiral (TS) maupun sampel dengan tulangan spiral (S). Penurunan terbesar dialami oleh sampel 25%GP yaitu sebesar 63,29% untuk TS dan sebesar 61,80% untuk S dibandingkan dengan sampel 0%GP pada umur 28 hari. Sampel S memiliki nilai tegangan lekat yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel TS. Tegangan lekat sampel 0%GP-S meningkat sebesar 15,08% dengan penggunaan tulangan spiral dibandingkan dengan sampel 0%GP-TS begitu pula dengan sampel 15%GP-S, 20%GP-S, 25%GP-S tegangan lekatnya meningkat masing-masing 15,29%; 10,89% dan 19,79 dibandingkan dengan sampel masing-masing 15%GP-TS, 20%GP-TS, 25%GP-TS. Sehingga, tulangan spiral sebagai efek confinement dapat meningkatkan kekuatan lekatan. Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan 15%GP menghasilkan nilai tegangan lekat yang cukup sebanding dengan 0%GP.

Kata kunci : Semen, Beton, Serbuk Kaca, Tulangan Senggang Sprial, *Pull-Out*, Tegangan Lekat.

ABSTRACT

DWI NURUL ILMIH AHKAM. The Effect Of Confinement on Bond Behavior in Reinforced Concrete with Glass Powder Variations as a Cement Substitution (supervised by **Andi Arwin Amiruddin, Herman Parung**)

The development of concrete with glass powder as a cement substitute is currently the subject of extensive research demonstrated to increase the strength of concrete. Glass waste is one of the materials that can be recycled as a substitute for supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete mixtures. The substitution of glass powder in cement will certainly affect the bond behavior that occurs between reinforcing steel and concrete in resisting working loads, especially axial forces that are tensile in nature so that the characteristics of the bond behavior between reinforcing steel and glass powder substituted concrete are critical parameters to be studied.

This study aims to analyze the bond behavior of concrete with glass powder variations as a substitute for cement to reinforcing steel without spiral reinforcement and with spiral reinforcement. The method used is characteristic testing and pull-out testing of steel reinforcement embedded in concrete cylinders with dimensions of 150x300 mm, a total of 24 pieces with a concrete quality of 21MPa and a steel quality of 400MPa referring to the ASTM C234 standard. The tests used a Universal Testing Machine with a capacity of 1000 kN with variations in glass powder substitution of 15%, 20% and 25% with and without spiral reinforcement.

The value of bond stress decreased with the increase in the use of glass powder as a substitute for cement in concrete mixtures in both samples without spiral reinforcement (TS) and samples with spiral reinforcement (S). The largest decrease was experienced by the 25%GP sample which amounted to 63.29% for TS and 61.80% for S compared to the 0%GP sample at the age of 28 days. The S sample has a higher bond stress value compared to the TS sample. The bond stress of the 0%GP-S sample increased by 15.08% with the use of spiral reinforcement compared to the 0%GP-TS sample as well as the 15%GP-S, 20%GP-S, 25%GP-S samples, the adhesive stress increased by 15.29%; 10.89% and 19.79 respectively compared to the 15%GP-TS, 20%GP-TS, 25%GP-TS samples. Thus, spiral reinforcement as a confinement effect can increase the adhesion strength. In addition, this study shows that the use of 15%GP results in adhesive stress values that are quite comparable to 0%GP.

Keywords: Cement, Concrete, Glass Powder, Spiral Confinement Reinforcement, Pull-Out, Bond Stress.

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGAJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Beton.....	6
2.2 Bahan Penyusun Beton	6
2.2.1 Semen Portland Komposit.....	7
2.2.2 Agregat	8
2.2.3 Air.....	10

2.2.4 Kaca	10
2.3 Baja Tulangan	14
2.4 Sengkang Spiral	16
2.5 Lekatan antara Beton dan Tulangan	17
2.6 Sifat –Sifat Keruntuhan Lekatan	22
2.7 Panjang Penyaluran Dasar l_d	23
2.8 Pengujian Pencabutan Keluar Pelekatan	27
2.9 Hubungan Panjang Penyaluran Terhadap Tegangan Lekat	27
2.10 Studi Empirik Penelitian Terdahulu	28
2.10.1 Kuat Lekat dan Kekangan pada Beton Bertulang (<i>Bond Strength and confinement in reinforced Concrete</i>), (Mak & Lees, 2022).	28
2.10.2 Sifat Mekanis, Kapasitas Dampak Energi, dan Ketahanan Ikatan beton yang mengandung bubuk kaca limbah (<i>Mechanical Properties, Energy Impact Capacity and Bond Resistance of concrete incorporating waste glass powder</i>), (Ubeid et al., 2020).....	29
2.10.3 Pengaruh Serbuk Kaca terhadap Kekuatan Rekat pada Beton Bertulang (<i>Effect of Glass Powder on Bond Strength in Reinforced Concrete</i>), (Shinde et al., 2019).....	29
2.10.4 Pengaruh Penggantian Semen dengan Limbah Gelas terhadap Sifat Mekanik Beton (<i>Influence of Replacing Cement with Waste Glass on Mechanical Properties of Concrete</i>) (Zeybek et al., 2022).....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1 Diagram Alir Penelitian	34
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	35
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	35
3.3.1 Bahan Penelitian	35
3.3.2 Alat Penelitian	37
3.4 Pemeriksaan Karakteristik Baja.....	37

3.5 Pemeriksaan Karakteristik Agregat	37
3.6 Pemeriksaan Karakteristik Serbuk Kaca	38
3.7 Pembuatan Benda Uji	38
3.8 Perawatan Benda Uji	43
3.9 <i>Set-Up</i> Pengujian	44
3.9.1 Set-Up Pengujian Pull Out	44
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Karakteristik Material	45
4.1.1 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tulangan Baja	45
4.1.2 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat.....	46
4.1.3 Hasil Pemeriksaan Karakteristik <i>Glass Powder</i>	47
4.2 Komposisi <i>Mix Design</i>	49
4.3 Hasil Pengujian Beton	50
4.3.1 Tegangan Lekat Baja Tulangan pada Beton.....	50
4.3.2 Perhitungan Panjang Penyaluran Minimum	62
4.3.3 Hasil Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	64
BAB V KESIMPULAN	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN.....	75

DAFTAR TABEL

Nomor	<u>Halaman</u>
Tabel 1. Komposisi Kimia Limbah Serbuk Kaca dan OPC	14
Tabel 2. Sifat Mekanis Baja Tulangan Beton.....	16
Tabel 3. Panjang Penyaluran Batang Ulir dan Kawat Ulir dalam Kondisi Tarik	25
Tabel 4. Faktor Modifikasi untuk panjang penyaluran batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik.....	26
Tabel 5. Matriks Penelitian-Penelitian Terdahulu.....	32
Tabel 6. Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	37
Tabel 7. Standar Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	38
Tabel 8. Rincian Benda Uji	39
Tabel 9. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Tulangan Baja.....	45
Tabel 10. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat	46
Tabel 11. Hasil Pengujian Karakteristik Glass Powder	47
Tabel 12 Hasil Pengujian XRF.....	49
Tabel 13. Rancangan Campuran Beton	50
Tabel 14. Rekapitulasi Tegangan Lekat (τ_u) Sampel Tanpa Spiral (TS)	61
Tabel 15. Rekapitulasi Tegangan Lekat (τ_u) Sampel dengan Spiral (S)	61
Tabel 16. Rekapitulasi Panjang Penyaluran Minimum Sampel dengan Tanpa Spiral (TS).....	63
Tabel 17. Rekapitulasi Panjang Penyaluran Minimum Sampel dengan Spiral (S)	63
Tabel 18. Rekapitulasi Panjang Penyaluran Minimum Berdasarkan SNI 2847:2019.....	64

DAFTAR GAMBAR

Nomor	<u>Halaman</u>
Gambar 1 ikhtisar proses untuk menggiling potongan kaca bersih menjadi material pozzolan	14
Gambar 2. Diagram tegangan-regangan hasil uji tarik baja	15
Gambar 3. Detail Sengkang Spiral	17
Gambar 4. Pola keruntuhan pada beton di sepanjang daerah lekatan	18
Gambar 5. Panjang penyaluran baja tulangan	21
Gambar 6. Bentuk kegagalan lekatan tulangan deformasian	23
Gambar 7. Pengujian Pencabutan Keluar Pelekatan, Dengan Distribusi-Distribusi Tegangan Pelekatan.	27
Gambar 8. Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 9. Bahan-Bahan Penelitian.....	36
Gambar 10. Rencana Benda Uji	39
Gambar 11. Benda Uji dengan Spiral	41
Gambar 12. Persiapan Material	41
Gambar 13. Proses Pencampuran Material	42
Gambar 14. Pengujian Slump	42
Gambar 15. Campuran Beton dalam Cetakan	43
Gambar 16. Perawatan Benda Uji	44
Gambar 17. Pengujian Pull-Out	44
Gambar 18. Mikrograf Sampel Glass Powder Botol.....	48
Gambar 19. Grafik Hasil Uji XRD sampel glass powder botol	48
Gambar 20. Hubungan Beban-Perpindahan Sampel Kontrol 0%GP-TS dan 0%GP-S.....	51
Gambar 21. Tipikal Keruntuhan Sampel 0%GP-TS Setelah di Uji Pull-Out.....	51
Gambar 22. Tipikal Keruntuhan Sampel 0%GP-S Setelah di Uji Pull-Out.....	52
Gambar 23. Hubungan Beban-Perpindahan Sampel 15%GP-TS dan 15%GP-S	53
Gambar 24. Tipikal Keruntuhan Sampel 15%GP-TS Setelah di Uji Pull-Out....	54

Gambar 25. Tipikal Keruntuhan Sampel 15%GP-S Setelah di Uji Pull-Out.....	54
Gambar 26. Hubungan Beban-Perpindahan Beton 20%GP Tanpa Spiral (TS) dan dengan Spiral (S).....	55
Gambar 27. Tipikal Keruntuhan Sampel 20%GP-TS Setelah di Uji Pull-Out....	56
Gambar 28. Tipikal Keruntuhan Sampel 20%GP-S Setelah di Uji Pull-Out.....	56
Gambar 29. Hubungan Beban-Perpindahan Beton 25%GP Tanpa Spiral (TS) dan dengan Spiral (S).....	57
Gambar 30. Tipikal Keruntuhan Sampel 25%GP-TS Setelah di Uji Pull-Out....	58
Gambar 31. Tipikal Keruntuhan Sampel 25%GP-S Setelah di Uji Pull-Out.....	58
Gambar 32. Hubungan Beban-Perpindahan Beton 0%GP, 15%GP, 20%GP dan 25%GP Tanpa Spiral (TS)	59
Gambar 33. Hubungan Beban-Perpindahan Beton 0%GP, 15%GP, 20%GP dan 25%GP dengan Spiral (S)	59
Gambar 34. Tegangan Lekatan Sampel Beton Glass Powder	61
Gambar 35. Hubungan ℓd_{min} dan τ_u	Error! Bookmark not defined.
Gambar 36. Mikrofoto SEM Sample 0%GP	65
Gambar 37. Mikrofoto SEM Sample 15%GP	66
Gambar 38. Mikrofoto SEM Sample 20%GP	67
Gambar 39. Mikrofoto SEM Sample 25%GP	68

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
CO ₂	= Karbon dioksida
SiO ₂	= Silikon dioksida
Al ₂ O ₃	= Aluminium oksida
Fe ₂ O ₃	= Ferioksida
UTM	= <i>Universal Testing Machine</i>
ASTM	= <i>American Society of Testing and Materials</i>
$f'c$	= Kuat tekan beton
kN	= kilo Newton
SNI	= Standar Nasional Indonesia
MPa	= Megapascal
GP	= <i>Glass Powder</i>
WGP	= <i>Waste Glass Powder</i>
XRF	= <i>X-ray Fluorescence</i>
OPC	= <i>Ordinary Portland Cement</i>
E	= Regangan
P	= Beban (N)
μ	= Kekuatan lekat antara beton dengan tulangan (Mpa)
L_d	= Panjang penanaman (mm)
L_{dmin}	= Panjang penyaluran minimum (mm)
d_s	= Diameter tulangan (mm)
f_y	= Tegangan leleh baja (Mpa)
A_s	= Luas tulangan (mm ²)
k	= Koefisien panjang penyaluran minimum
D	= Diameter tulangan (mm)

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	<u>Halaman</u>
Lampiran 1. Proses Pemilahan Limbah Kaca Botol.....	75
Lampiran 2. Proses pengilingan kaca botol menjadi serbuk kaca.....	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan laju pembangunan yang semakin pesat dan beragam. Beton masih menjadi material konstruksi utama yang dipilih masyarakat. Beton adalah campuran semen yang homogen sebagai bahan pengikat, pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar dimana semen memberikan kekuatan tinggi pada beton (Lalitha. et al., 2017). Namun produksi semen memberikan banyak masalah pada lingkungan (Islam et al., 2017a). Proses pembuatan semen dalam industri memerlukan energi yang intensif dan berpolusi dengan menghasilkan sekitar 5–8% dari keseluruhan emisi karbon dioksida (CO₂) (Aliabdo et al., 2016). Sehingga, substitusi bahan limbah (*waste material*) pada pembuatan beton merupakan alternatif dalam upaya pengurangan penggunaan semen. Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) memperkirakan volume limbah padat yang dibuang setiap tahun mencapai 200 juta ton, 7% di antaranya terdiri dari kaca di seluruh dunia (Topçu & Canbaz, 2004).

Limbah kaca dalam jumlah besar masih dikirim ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sebagai residu karena kaca tidak dapat terurai secara hayati, tempat pembuangan sampah bukanlah solusi ramah lingkungan. Penggunaan limbah kaca daur ulang pada semen portland dan beton juga menarik banyak perhatian di seluruh dunia karena meningkatnya biaya pembuangan dan masalah lingkungan. Hal inilah yang melatarbelakangi dikembangkannya beton ramah lingkungan dengan limbah kaca daur ulang, yaitu beton kaca daur ulang. Akhir-akhir ini banyak penelitian yang berfokus pada pemanfaatan limbah kaca sebagai agregat beton semen atau sebagai pengganti semen. Limbah kaca adalah salah satu material yang dapat didaur ulang sebagai pengganti bahan semen tambahan (*Supplementary Cementitious Materials* atau SCMs). Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa substitusi partikel kaca halus (*glass powder*) yang dihancurkan menunjukkan karakteristik pozzolan dan limbah kaca dapat digunakan dalam industri konstruksi. Fraksi serbuk kaca dengan ukuran #200 dan #325 menunjukkan aktivitas pozzolanik (Lopes Borges et al., 2021), berdasarkan standar ASTM C618-05 dan memenuhi

persyaratan bahan pozzolan dengan jumlah oksida (SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3) lebih besar dari 70%. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Rajendran, dkk., 2021 menjelaskan bahwa beton dengan penggantian semen yang menggunakan serbuk kaca (*glass powder*) dalam variasi proporsi tertentu, mutu betonnya dapat dicapai bahkan pada substitusi 20% *glass powder* sebagai pengganti semen dapat menambah kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur pada beton dibandingkan beton kontrol. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Elaqra et al., 2019) dengan menggunakan 3 variasi persentase substitusi *glass powder* sebagai pengganti semen yaitu 10%, 20%, dan 30%. Elaqra menjelaskan bahwa kuat tekan beton optimum diperoleh pada substitusi 20% *glass powder*, kuat tekan betonnya meningkat sekitar 5% dibandingkan beton kontrol dan menurun sejauh 20% dibandingkan beton control pada substitusi 30% *glass powder*.

Beton itu sendiri memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan material lainnya, seperti beton dapat dengan mudah dibentuk sesuai kebutuhan, kuat terhadap tekan, tahan terhadap suhu tinggi dan biaya pemeliharaan yang relatif murah. Namun, beton merupakan material struktural yang lemah terhadap kuat tarik sehingga umumnya dikombinasikan dengan baja tulangan membuat satu kesatuan sebagai material komposit yang selanjutnya disebut sebagai beton bertulang. Konfigurasi baja tulangan dan beton bekerjasama dalam memikul beban yang terjadi, dimana beton akan menahan gaya tekan sedangkan baja tulangan akan menahan gaya tarik. Selain itu, salah satu aspek penting dalam beton dan baja tulangan dapat bekerja sama adalah lekatan (*bond*) antara baja tulangan dengan beton. Lekatan merupakan kombinasi kemampuan antara tulangan dan beton yang menyelimutinya dalam menahan gaya-gaya yang dapat menyebabkan lepasnya lekatan antara tulangan dan beton (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 lekatan elemen baja tulangan dengan beton adalah *pullout test* (Edward G. Nawy, 1990). Pengujian ini dapat memberikan perbandingan lekatan yang efisien terhadap permukaan tulangan

dengan beton dan Panjang tulangan yang tertanam didalam beton karena gaya yang digunakan adalah gaya tarik aksial sehingga menimbulkan tegangan lekat aksial pula.

Pengembangan beton dengan *glass powder* sebagai pengganti semen saat ini merupakan bahan penelitian yang ekstensif ditunjukkan dengan dapat menambah kekuatan pada beton tersebut. Substitusi serbuk kaca sebagai pengganti semen dalam pembuatan beton tentu akan mempengaruhi daya lekatan yang terjadi antara baja tulangan dengan beton tersebut dalam menahan beban yang bekerja, terutama gaya aksial yang bersifat tarik sehingga karakteristik lekatan antara baja tulangan dengan beton substitusi *glass powder* adalah parameter yang kritis untuk diteliti. Tegangan lekat pada beton bertulang adalah satu sifat yang dimiliki pada struktur beton bertulang dengan besarnya dapat dihitung berdasarkan gaya per satuan keliling besi tulangan yang diselimuti oleh beton. Beberapa hal yang dapat mempengaruhi kekuatan lekat antara lain: diameter baja tulangan, panjang penyaluran, mutu beton, permukaan besi, kadar rongga yang membatasi antara besi dan beton, dan sebagainya.

Berdasarkan hasil peneltian-penelitian terdahulu yang telah dijelaskan sebelumnya, penting untuk memahami perilaku dan mekanisme ikatan atau lekatan antara baja tulangan dengan beton substitusi *glass powder* sebagai pengganti semen, dengan 3 variasi proporsi substitusi *glass powder* yaitu 15%, 20% dan 25%. Adapun penelitian yang akan dilakukan dan diwujudkan dalam penyusunan Tesis dengan judul: **“Pengaruh Tulangan Pengekang pada Lekatan Beton Bertulang dengan Variasi *Glass Powder* sebagai Substitusi Semen”**.

1.2 Rumusan Permasalahan

Adapun rumusan permasalahan pada penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Bagaimana perilaku lekatan beton dengan variasi *glass powder* sebagai substitusi semen tanpa tulangan pengekang?
2. Bagaimana perilaku lekatan beton dengan variasi *glass powder* sebagai substitusi semen dengan tulangan pengekang?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Menganalisis perilaku lekatan beton dengan variasi *glass powder* sebagai substitusi semen tanpa tulangan pengekang,
2. Menganalisis perilaku lekatan beton dengan variasi *glass powder* sebagai substitusi semen dengan tulangan pengekang,

1.4 Ruang Lingkup

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

1. Pengujian “*pull-out test*” menggunakan alat *Universal Testing Machine (UTM)* kapasitas 1000 kN dengan modifikasi seperlunya dan menggunakan sampel uji berbentuk silinder.
2. Pedoman yang digunakan sebagai acuan adalah ASTM (*American Society of Testing and Materials*) dan SNI (Standar Nasional Indonesia)
3. 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,
4. Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement Bosowa*
5. Menggunakan beton dengan variasi *glass powder* 15%, 20% dan 25% sebagai substitusi semen,
6. Limbah kaca yang digunakan adalah limbah kaca botol yang dihancurkan hingga lolos saringan no. 200,
7. Jumlah benda uji sebanyak 18 buah, untuk benda uji tanpa tulangan pengekang sebanyak 9 buah dan dengan tulangan pengekang sebanyak 9 buah.
8. Silinder beton yang digunakan menggunakan dimensi 150 x 300 mm, dengan $f'c : 25$ MPa.
9. Melakukan pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)* pada material serbuk kaca,
10. Melakukan pengujian *Scanning Electron Microscopy (SEM)* pada setiap sampel beton *pull-out*,

11. Melakukan pengujian kuat tarik pada baja tulangan D13mm dan P6mm.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sbagai berikut,

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

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton adalah bahan komposit (campuran) yang komposisi utamanya terdiri dari agregat halus, agregat kasar, semen *portland*, air dan/atau tanpa bahan tambahan lainnya dengan beberapa perbandingan tertentu. Sehingga daktalitas beton sangat bergantung pada kualitas masing-masing jenis material pembentuknya (Tjokrodinuljo, 2007). Beton adalah campuran semen yang homogen sebagai bahan pengikat, pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar dimana semen memberikan kekuatan tinggi pada beton (Lalitha. et al., 2017). Perencanaan pencampuran, jenis, mutu dan jumlah bahan komponen beton harus dihitung menurut takaran atau proporsi tertentu untuk menghasilkan mutu beton yang diinginkan. Selain itu, definisi beton adalah campuran antara semen, air dan agregat dengan atau tanpa bahan tambahan campuran yang membentuk suatu massa padat (SK SNI T-15-1991-03). Pengerasan terjadi karena adanya reaksi kimia antara air dan semen yang berlangsung dalam jangka waktu yang lama, sehingga campuran menjadi semakin keras sebanding dengan umurnya, jarak antar partikelnya besar (kerikil atau batu pecah) diisi dengan bahan partikel yang lebih kecil. (agregat halus, pasir) dan rongga antara agregat halus ini diisi dengan semen dan air (pasta semen).

Beton yang paling banyak digunakan saat ini adalah beton normal, beton dengan kapasitas pemakaian 2.200 - 2.500 kg/m³ agregat alam yang dipecah atau tidak pecah, dengan kuat tekan sebesar 15-40 MPa.

2.2 Bahan Penyusun Beton

Pada dasarnya bahan utama penyusun beton adalah semen, pasir, kerikil dan air. Jika diperlukan bahan tambah (*admixture*) dapat ditambahkan untuk mengubah sifat-sifat tertentu dari beton. Komposisi beton yang akan dibuat pada penelitian ini terdiri dua jenis perlakuan dimana pertama dibuat perancangan beton kontrol, yang kedua adalah perancangan beton variasi dengan substitusi serbuk kaca ke dalam campuran semen. Manufaktur produksi semen memberikan banyak masalah pada

lingkungan (Islam et al., 2017a). Substitusi bahan limbah (*waste material*) pada pembuatan beton merupakan salah satu alternatif dalam upaya pengurangan penggunaan semen. Beton dengan penggantian semen yang menggunakan serbuk kaca (*glass powder*) dalam variasi proporsi tertentu, mutu betonnya dapat dicapai bahkan pada substitusi 20% serbuk kaca (*glass powder*) sebagai pengganti semen dapat menambah kuat tekan, kuat tarik dan kuat lentur pada beton dibandingkan beton normal (Rajendran et al., 2021). Limbah kaca adalah salah satu material yang dapat didaur ulang sebagai pengganti bahan semen tambahan (*Supplementary Cementitious Materials* atau SCMs). Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa substitusi partikel kaca halus (*glass powder*) yang dihancurkan menunjukkan karakteristik pozzolan dan limbah kaca dapat digunakan dalam industri konstruksi.

Komposisi beton kontrol ini sendiri terdiri dari semen portland, batu pecah (*split*), pasir dan air, sedangkan komposisi penggantinya terdiri dari semen portland, batu pecah, serbuk kaca, pasir dan air sebagai campuran yang akan direncanakan pada perancangan pembuatan beton.

2.2.1 Semen Portland Komposit

Semen Portland ialah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker, yang terutama dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dan gips sebagai bahan pembantu (SK SNI S-04-1989). Fungsi semen adalah bereaksi dengan air membentuk pasta semen, mengikat partikel agregat menjadi satu sehingga membentuk massa padat, dan juga mengisi celah-celah antar partikel agregat.

Ketika semen dicampur dengan air, terjadi reaksi kimia antara campuran dan air. Pada tingkatan awal, sejumlah kecil dari “retarder” cepat terlarut dan dapat berpengaruh terhadap reaksi-reaksi kimia lainnya yang sedang mulai. Reaksi-reaksi ini menghasilkan berbagai senyawa kimia yang menyebabkan ikatan dan pengerasan, 4 senyawa kimi yang Menyusun semen Portland (Murdock & Brook, 1991) adalah,

- a. Tricalcium aluminate ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) C3A, senyawa ini mengalami hidrasi sangat cepat disertai pelepasan sejumlah besar panas menyebabkan pengerasan awal, tetapi kurang kontribusinya pada kekuatan beton,
- b. Tricalcium silikat ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) C3S, senyawa ini mengeras dalam beberapa jam dengan melepas sejumlah panas. Kuantitas yang terbentuk dalam ikatan menentukan pengaruhnya terhadap kekuatan beton pada awal umumnya, terutama dalam 14 hari pertama,
- c. Dicalcium silikat ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) C2S, senyawa ini berpengaruh terhadap proses peningkatan kekuatan yang terjadi dari 14-28 hari dan seterusnya,
- d. Tetra calcium aluminoferrite ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) C4AF, kurang penting karena tidak tampak pengaruhnya terhadap kekuatan dan sifat-sifat semen keras lainnya.

Bila sentuhan dengan air maka proses hidrasi berlangsung dengan arah dari luar ke dalam, maksudnya hasil hidrasi mengendap di bagian luar dan inti semen yang belum terhidrasi di bagian dalam secara bertahap sehingga volumenya mengecil (Tjokrodinuljo, 2007).

2.2.2 Agregat

Agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini membentuk sekitar 70% dari volume beton. Secara umum agregat dapat dibedakan menurut ukurannya yaitu agregat kasar dan agregat halus. Batas ukuran antara agregat halus dan kasar adalah 4,80 mm (*british standard*) atau 4,75 mm (ASTM). Agregat kasar adalah batuan dengan ukuran partikel lebih besar dari 4,80 mm (4,75 mm) dan agregat halus adalah batuan dengan ukuran kurang dari 4,80 mm (4,75 mm). Agregat yang lebih besar dari 4,80 mm dibagi menjadi dua kategori: yang berdiameter 4,80 hingga 40 mm disebut kerikil beton dan yang lebih besar dari 40 mm disebut kerikil kasar.

Adapun persyaratan menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI '71), bahwa agregat halus yang digunakan sebagai bahan campuran beton adalah :

- a. Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan – batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan alat – alat pemecah batu.

- a. Agregat halus yang digunakan harus terdiri dari butir – butiran yang tajam, keras serta bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh – pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- b. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian – bagian yang dapat melalui ayakan 0.063 mm. apabila kadar lumpur melebihi 5%, maka agregat halus harus dicuci.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan – bahan organis terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dari Abram – Harder (dengan larutan NaOH)
- d. Agregat halus harus terdiri dari butir – butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak harus memenuhi syarat – syarat berikut: - Sisa diatas ayakan 4 mm harus minimum 2% berat. - Sisa diatas ayakan 1 mm harus minimum 10% berat. - Sisa diatas ayakan 0.25 mm, harus berkisar antara 80% dan 95% berat.

Sedangkan, persyaratan menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI '71) bahwa agregat kasar yang digunakan sebagai bahan campuran beton adalah :

- a. Agregat kasar dalam beton dapat berupa kerikil sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan – batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu.
- b. Agregat kasar harus terdiri dari butir – butir yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang mengandung butir – butir yang pipih hanya dapat 16 dipakai, apabila jumlah butir – butir yang pipih tersebut tidak melampaui 20% dari berat agregat seluruhnya. Butir–butir agregat kasar harus bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh – pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
- c. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% (ditentukan terhadap berat kering). Yang diartikan dengan lumpur adalah bagian – bagian yang dapat melalui ayakan 0.063 mm. apabila kadar lumpur melebihi 1% maka agregat kasar harus dicuci.
- d. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat – zat yang dapat merusak beton, seperti zat – zat yang reaktif alkali.

- e. Kekerasan dari butir – butir agregat kasar diperiksa dengan bejana penguji dari Rudeloff dengan beban penguji 20T, dengan harus memenuhi syarat-syarat berikut :
- Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9.5 – 19 mm lebih dari 24% berat.
 - Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 19 – 30 mm lebih dari 22% berat.

2.2.3 Air

Air merupakan bahan dasar yang penting untuk produksi beton. Air dibutuhkan untuk bereaksi dengan semen, dan juga sebagai pelumas antara partikel agregat untuk kemudahan aplikasi pada media yang dipadatkan. Penyebab kadar air rendah beton sulit dikerjakan (tidak mudah mengalir) dan memiliki kadar air yang tinggi membuat kekuatan beton menjadi lemah dan beton berlubang. Air yang disiapkan harus bersih, bebas dari minyak, asam, alkali, bahan organik atau zat lain dapat merusak beton.

Dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut:

- a. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
- b. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.
- c. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- d. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Untuk air perawatan, dapat dipakai juga air yang dipakai untuk pengadukan, tetapi yang harus tidak menimbulkan noda atau endapan yang merusak warna permukaan beton. Besi dan zat organik dalam air umumnya sebagai penyebab utama pengotoran atau perubahan warna, terutama jika perawatan cukup lama.

2.2.4 Kaca

Kaca adalah sebuah substansi yang keras dan rapuh, serta merupakan padatan amorf dikarenakan bahan – bahan pembuat kaca bersifat amorf yang mana dapat meleleh dengan mudah. Kaca merupakan hasil penguraian senyawa–senyawa inorganik yang mana telah mengalami pendinginan tanpa kristalisasi. Dari segi kimia, kaca adalah gabungan dari berbagai oksida anorganik yang tidak mudah

menguap, yang dihasilkan dari dekomposisi dan peleburan senyawa alkali dan alkali tanah, pasir serta berbagai penyusun lainnya. Sifat-sifat kaca yang khas dipengaruhi oleh keunikan silika (SiO_2) dan proses pembentukannya. Komponen utama dari kaca adalah silika. Adapun oksida – oksida yang digunakan untuk menyusun komposisi kaca dapat digolongkan menjadi sebagai berikut,

1. *Glass former* adalah oksida utama pembentuk kaca
2. *Intermediate* adalah oksida yang menyebabkan kaca mempunyai sifat-sifat spesifik seperti menyerap *Ultra Violet (UV)*, menahan radiasi dan lainnya,
3. *Modifier* adalah oksida yang tidak menyebabkan kaca memiliki elastisitas, ketahanan suhu, tingkat kekerasan dan lainnya.

Berdasarkan Kaminsky, dkk., 2020, jenis-jenis kaca yang diproduksi di dunia adalah sebagai berikut,

1. *Container glass* (biasanya digunakan pada kemasan), jenis kaca ini adalah umumnya kaca *soda-lime* diproduksi dalam batu api (bening), hijau, warna biru, atau kuning dan dibentuk oleh tekanan udara dalam cetakan,
2. *Plate glass* (digunakan sebagai kaca pada bangunan dan mobil), bahan ini juga umumnya berupa kaca *soda-lime* yang diproduksi dalam warna bening atau berwarna dan dibentuk dengan mengapung di atas timah cair,
3. *E-glass* (digunakan sebagai *fiber-reinforced polymers*), bahan ini adalah kaca alkali rendah yang dibentuk dengan ekstrusi melalui busung untuk membentuk filamen yang dengan cepat ditarik ke diameter halus sebelum mengeras.

Selain itu, adapun sifat-sifat dari kaca adalah sebagai berikut,

1. Sifat mekanik : Tension strength atau daya tarik adalah sifat mekanik utama dari kaca. Tensile strength merupakan tegangan maksimum yang dialami oleh kaca sebelum terpisahnya kaca akibat adanya tarikan (fracture). Sumber fracture ini dapat muncul jika kaca mempunyai cacat di permukaan, sehingga tegangan akan terkonsentrasi pada cacat tersebut. Kekuatan dari kaca akan bertambah jika cacat di permukaan dapat dihilangkan.
2. Densitas dan Viskositas : Densitas adalah perbandingan antara massa suatu bahan dibagi dengan volumenya. Nilai densitas dari kaca adalah sekitar $2,49 \text{ g/cm}^3$. Densitas dari kaca akan menurun seiring dengan kenaikan temperatur.

Sedangkan, viskositas merupakan sifat kekentalan dari suatu cairan yang diukur pada rentang temperatur tertentu. Viskositas dari kaca sekitar $4,5 \times 10^7$ poise. Harga viskositas dari kaca merupakan fungsi dari suhu dengan kurva eksponensial.

3. Sifat termal : Konduktivitas panas dan panas ekspansi merupakan sifat thermal yang penting dari kaca. Kedua sifat ini digunakan untuk menghitung besarnya perpindahan panas yang diterima oleh cairan kaca tersebut. Nilai dari tahanan kaca sekitar $1020 - 1 \Omega \text{ cm}^{13}$.
4. Optical properties :
 - Refractive properties : Kaca mempunyai sifat memantulkan cahaya yang jatuh pada permukaan kaca tersebut. Sebagian sinar dari kaca yang jatuh itu akan diserap dan sisanya akan diteruskan. Apabila cahaya dari udara melewati medium padat seperti kaca, maka kecepatan cahaya saat melewati kaca menurun. Perbandingan antara kecepatan cahaya di udara dengan kecepatan cahaya yang lewat gelas ini disebut dengan indeks bias. Nilai indeks bias untuk kaca adalah $\pm 1,52$.
 - Absorptive properties : Intensitas cahaya yang masuk ke dalam akan berkurang karena adanya penyerapan sepanjang tebal kaca tersebut. Jika kaca semakin tebal, maka energi cahaya yang diserap akan semakin banyak sedangkan intensitas cahaya yang masuk melalui kaca akan semakin rendah.
5. Stabilitas kimia : Stabilitas kimia adalah ketahanan suatu bahan terhadap pengaruh zat kimia. Stabilitas kimia banyak dipengaruhi oleh bahan – bahan pembentuk kaca.

Adapun bahan baku kaca yaitu :

1. Pasir silika merupakan sumber dari SiO_2 . Pasir silika yang digunakan sebagai bahan baku kaca adalah pasir silika yang tidak banyak mengandung pengotor, baik dari bahan organik maupun bahan anorganik. Pasir silika berguna untuk membentuk cairan gelas yang sangat kental yang memiliki ketahanan terhadap perubahan temperature yang mendadak.

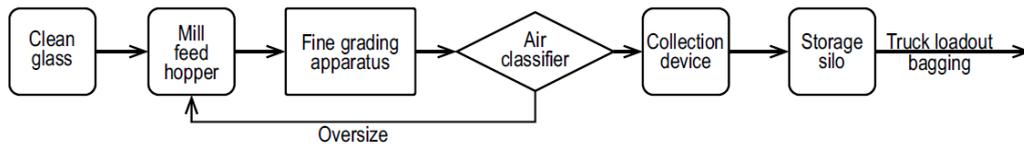
2. Dolomite ($\text{CaO.MgO.H}_2\text{O}$) digunakan sebagai sumber CaO dan MgO . Dolomite ini biasanya berupa mineral tambang berwarna putih. Penggunaan dolomite sangat penting karena dapat mempermudah peleburan (menurunkan temperatur peleburan) serta mempercepat proses pendinginan kaca.
3. Soda Ash (Na_2CO_3) ini digunakan sebagai sumber Na_2O dan K_2O . Fungsi dari Na_2O adalah menurunkan titik lebur. Secara umum, penggunaan Soda Ash adalah mempercepat pembakaran, menurunkan titik lebur, mempermudah pembersihan gelembung dan mengoksidasi besi.
4. Cullet merupakan sisa – sisa dari pecahan kaca yang dapat digunakan sebagai salah satu bahan baku utama dari produksi kaca. Tujuan dari penggunaan cullet ini adalah mengurangi 3 bahan baku utama di atas sehingga biaya produksi dapat semakin kecil. Komposisi kimia dari cullet sama dengan komposisi kimia kaca yang diproduksi. Selain itu, penggunaan cullet ini dapat memperkecil melting point atau titik lebur dari pembuatan kaca, sehingga dapat menghemat penggunaan bahan bakar.

Penelitian yang terdahulu (Binici et al., 2007; Nassar & Soroushian, 2011; Ryou et al., 2006) menunjukkan bahwa komposisi kimia dari *glass powder* dapat digunakan sebagai *supplementary cementitious materials* (SCMs). Sifat pozzolan kaca pertama kali terlihat pada ukuran partikel di bawah sekitar $300\mu\text{m}$, dan di bawah $100\mu\text{m}$, kaca memiliki reaktivitas pozzolan pada tingkat penggantian semen yang rendah setelah 90 hari pengawetan (Shi et al., 2005). Ukuran tersebut dapat dicapai dengan melakukan penggilingan menggunakan “*Ball Mill*” yang umumnya digunakan dalam industri semen untuk menggiling klinker semen. Komposisi kimia dari serbuk kaca (bening dan berwarna) dibandingkan dengan semen OPC (*Ordinary Portland Cement*) ditunjukkan pada Tabel 1 di bawah merupakan hasil uji XRF yang dilakukan oleh Islam et al., 2017

Tabel 1. Komposisi Kimia Limbah Serbuk Kaca dan OPC

Komposisi	Serbuk Kaca Bening (<i>Clear Glass Powder</i>)	Serbuk Kaca Warna (<i>Color Glass Powder</i>)	<i>Ordinary Portland Cement (OPC)</i>
SiO ₂	68,1	68,7	22,8
Al ₂ O ₃	0,9	1,0	5,9
Fe ₂ O ₃	0,6	0,9	3,5
CaO	14,5	12,0	63,0
MgO	1,8	1,8	1,5
K ₂ O	0,8	1,0	1,0
Na ₂ O	12,2	13,3	0,1
SO ₃	0,4	0,1	2,0

Sumber : Islam et al., 2017

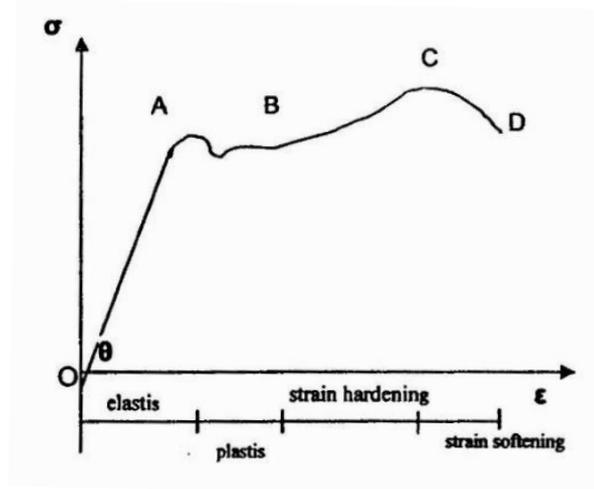


Gambar 1 ikhtisar proses untuk menggiling potongan kaca bersih menjadi material pozzolan

(Sumber :Kaminsky et al., 2020)

2.3 Baja Tulangan

Beton merupakan bahan struktur yang lemah dalam hal kekuatan tarik, sehingga biasanya digabungkan dengan tulangan untuk membentuk satu bahan komposit yang disebut beton bertulang. Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa retak. Oleh karena itu, agar beton dapat bekerja dengan baik pada sistem struktur, maka harus dibantu dengan baja tulangan yang terutama memenuhi tugas menahan gaya tarik yang masuk ke dalam sistem.



Gambar 2. Diagram tegangan-regangan hasil uji tarik baja

(Sumber : (Park & Paulay, 1975)

Dalam struktur beton bertulang, upaya harus dilakukan untuk memungkinkan tulangan dan beton berdeformasi pada saat yang bersamaan. Ini dimaksudkan agar terdapat ikatan yang kuat di antara keduanya dan berlangsung lekatan erat antara baja tulangan dengan beton.

Gambar 1 merupakan diagram hasil uji tarik pada baja yang dibebani secara static. Garis O-A menunjukkan fase elastis, dimana pada fase ini hubungan tegangan regangan adalah linier. Titik A disebut batas proporsional, tegangan dititik A disedut tegangan proporsional yang nilainya sangat dekat dengan tegangan leleh (f_y) dengan regangan sebesar 0,002. Kemiringan (*sloop*) garis O-A menunjukkan modulus elastisitas (E) yang dikenal juga sebagai *young modulus*. Diatas batas elastis, tegangan yang terjadi relatif konstan, sedangkan regangan terus bertambah hingga mencapai titik B. Garis A-B menunjukkan keadaan plastis. Setelah melampaui titik B tegangan dan regangan meningkat kembali dan mencapai tegangan maksimum dititik C, dimana di C disebut tegangan ultimit (kuat tarik baja) dengan nilai regangan berbeda tergantung mutu bajanya. Fase B-C disebut pergeseran regangan (*strain hardening*). Setelah melampaui titik C, penampang baja mengalami penyempitan (*necking*) yang mengakibatkan tegangan menurun dan akhirnya baja putus di D dengan nilai regangan yang berbeda tergantung mutu bajanya. Fase C-D disebut pelunakan regangan (*strain softening*). Adapun sifat mekanis baja berdasarkan SNI 2052-2017 dapat dilihat pada **Tabel 2**

Tabel 2. Sifat Mekanis Baja Tulangan Beton

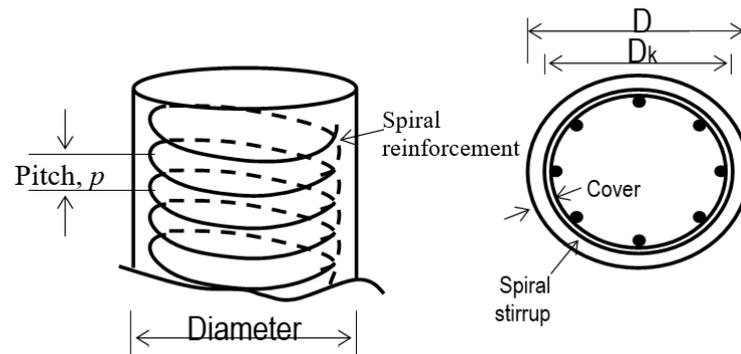
Kelas baja tulangan	Uji tarik		
	Kuat luluh/leleh (YS)	kuat tarik (TS)	Regangan dalam 200 mm, Min.
	Mpa	Mpa	%
BjTP 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)
			12 ($d \geq 12$ mm)
BjTS 280	Min. 280 Maks. 405	Min. 350	11 ($d \leq 10$ mm)
			12 ($d \geq 13$ mm)
BjTS 420A	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	9 ($d \leq 19$ mm)
			8 ($22 \leq d \leq 25$ mm)
			7 ($d \geq 29$ mm)
BjTS 420B	Min. 420 Maks. 545	Min. 525	14 ($d \leq 19$ mm)
			12 ($22 \leq d \leq 36$ mm)
			10 ($d > 36$ mm)
BjTS 520	Min. 520 Maks. 645	Min. 650	7 ($d \leq 25$ mm)
			6 ($d \geq 29$ mm)
BjTS 550	Min. 550 Maks. 675	Min. 687,5	7 ($d \leq 25$ mm)
			6 ($d \geq 29$ mm)
BjTS 700	Min. 700 Maks. 825	Min. 805	7 ($d \leq 25$ mm)
			6 ($d \geq 29$ mm)

Sumber : SNI 2052-2017

2.4 Sengkang Spiral

Tulangan spiral adalah tipe lain dari tulangan lateral, tulangan ini bisa disebut sebagai *helical lateral* (Edward G. Nawy, 1990). Tulangan spiral membantu meningkatkan daktilitas dari beton. Beton di luar pengaruh pengekanan kolom tulangan spiral mengalami spalling yang tidak alami, yang mengakibatkan gaya lateral mendadak seperti gaya seismik. Jarak antar tulangan spiral dibatasi antara 1 sampai 3 inci (25,4-76,2 mm).

Kemampuan *confinement* beton untuk menahan beban diakibatkan oleh penambahan tekanan lateral pada core (inti) beton dengan memperbanyak jumlah lilitan spiral beton seperti terlihat pada Gambar 2 dibawah, Sengkang spiral didesain untuk meningkatkan kemampuan inti (*core*) beton (Ghoneim & El-Mihilmy, 2008).



Gambar 3. Detail Senggang Spiral
(Sumber: Ghoneim & El-Mihilmy, 2008)

2.5 Lekatan antara Beton dan Tulangan

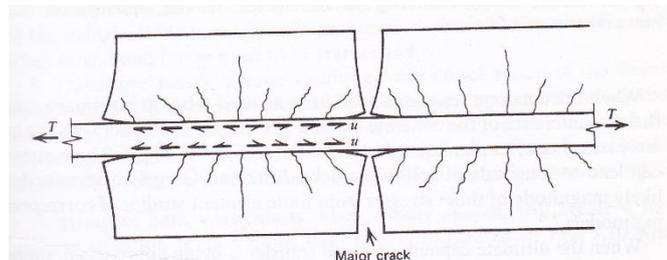
Pada umumnya penggunaan tulangan pokok pada struktur beton bertulang merupakan untuk menggantikan kuat tarik material beton yang lemah. Tegangan tarik yang terjadi pada beton ditransfer ke tulangan melalui mekanisme pengikatan, yang memungkinkan kedua material, beton dan tulangan, untuk bekerja sama membentuk unit ikatan material.

Kuat lekat merupakan kombinasi kemampuan antara baja tulangan dan beton yang menyelimutinya dalam menahan gaya-gaya yang dapat menyebabkan lepasnya lekatan antara baja tulangan dan beton (Winter & Nilson, 1993). Salah satu anggapan dasar yang digunakan dalam perencanaan dan analisis struktur beton bertulang adalah lekatan batang tulangan baja dengan beton yang mengelilinginya berlangsung sempurna tanpa terjadi penggelinciran atau pergeseran. Berdasarkan atas anggapan tersebut pada waktu komponen struktur beton bertulang bekerja menahan beban akan timbul tegangan lekat berupa *shear interlock* pada permukaan singgung antara batang tulangan dengan beton (Dipohusodo, 1994).

Tulangan polos dapat terlepas dari beton karena terbelah di arah memanjang bila adhesi atau perlawanan gesek cukup tinggi, atau dapat terlepas keluar dengan meninggalkan lobang bulat didalam beton untuk adhesi dan tahanan gesek yang rendah, sedangkan batang tulangan berprofil lebih mengandalkan tahanan dari gerigi terhadap beton. Keruntuhan lekatan (*bond failure*) tulangan berprofil di dalam beton berbobot normal hampir selalu merupakan keruntuhan

akibat terbelahnya beton. Pada pola keruntuhan pembelahan ini, beton terbelah menjadi dua atau tiga bagian karena aksi baji (*wedging*) dari gerigi terhadap beton (Wang & Salmon, 1993).

Pada *Pull-Out Test* tulangan ditarik dari beton sehingga beton di sekelilingnya mengalami tekan. Pada penggunaan sebagai salah satu komponen bangunan, beton selalu diperkuat dengan batang baja tulangan yang diharapkan baja dapat bekerja sama dengan baik, sehingga hal ini akan menutup kelemahan yang ada pada beton yaitu kurang kuat dalam menahan gaya tarik, sedangkan beton hanya diperhitungkan untuk menahan gaya tekan. Adapun Gambar di bawah ini menunjukkan pola retak yang terjadi di sekitar tulangan polos yang melekat pada matriks beton.



Gambar 4. Pola keruntuhan pada beton di sepanjang daerah lekatan

Menurut Edward G. Nawy, 1990 kuat lekat antara baja tulangan dan beton yang membungkusnya dipengaruhi oleh faktor:

1. Adhesi antara elemen beton dan bahan penguatnya yaitu tulangan baja. 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 disekeliling tulangan.
3. Tahanan Geser (friksi) terhadap gelincir dan saling “mengunci” pada saat elemen tulangan mengalami tarik. Mekanisme ini terbentuk karena adanya permukaan yang tidak beraturan pada bidang kontak antara tulangan dengan beton.

4. Efek kualitas beton termasuk 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/panjang lewatan, bengkokan tulangan, dan persilangan tulangan.
6. Diameter, bentuk, dan jarak tulangan karena semuanya mempengaruhi pertumbuhan retak. Kesemuanya ini mempunyai pengaruh terhadap pertumbuhan retak radial. Diameter yang terlalu kecil akan mengakibatkan keruntuhan putus pada tulangan karena kuat lekatnya terlalu jauh lebih tinggi dari pada kuat putus baja. Sedangkan diameter yang terlalu besar akan mengakibatkan keruntuhan *slip*, karena kuat tarik baja lebih besar dari kuat lekatnya sehingga akan terjadi slip yang didahului oleh retak belah yang sangat cepat. Bentuk tulangan polos keruntuhan akan berupa slip karena kuat lekat beton sangat kecil, sedangkan bentuk ulir akan mengalami keruntuhan belah, jarak tulangan yang terlalu dekat dibanding selimut beton, maka akan terjadi keruntuhan belah.
7. *Interlocking*, mekanisme ini terbentuk karena adanya interaksi antara tulangan ulir/tonjolan tulangan dengan matriks beton yang ada disekitarnya, mekanisme ini sangat bergantung pada kekuatan, kepadatan material beton, geometrid an diameter tulangan.
8. Selimut beton, selimut beton yang tidak mencukupi untuk mengakomodasi tegangan tarik keliling akan mengakibatkan retak belah yang selanjutnya mengakibatkan kehancuran belah.
9. Korosi, korosi/karat akan mengakibatkan turunya *adhési*, *gripping*, *friksi* antara beton dan tulangan sehingga mengurangi kuat lekat.

Kontribusi masing-masing faktor ini sulit dipisahkan satu dengan yang lainnya. Kontribusi beton dengan adanya faktor saling geser, susut dan mutu beton ditambah dengan kontribusi tulangan baja yang bergantung pada dimensi, bentuk dan jarak tulangan ditambah dengan efek mekanis saling berinteraksi satu dengan yang lainnya dalam memberikan kekuatan lekatan kedua material.

Untuk tulangan polos, lekatan antara tulangan dan beton dibentuk oleh adanya *adhési* dan *friksi*. Pada saat pembebanan awal *adhési* dan *friksi* bekerja

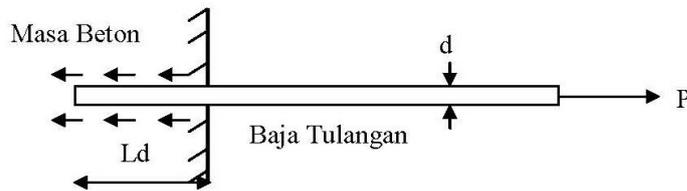
bersama-sama hingga tercapai kondisi beban maksimum. Pada kondisi ini *adhesi* mulai rusak sehingga lekatan antara beton dan tulangan hanya dipikul oleh *friksi* saja. Selanjutnya kapasitas lekatan berangsur-angsur turun karena berkurangnya *friksi* yang menyebabkan *slip*.

Huang et al., (1991), mengatakan pada pembebanan tertentu dimana tulangan polos mencapai tegangan lelah, *adhesi* dan *friksi* dapat hilang dengan cepat, hal ini disebabkan karena adanya pengecilan diameter (pengaruh *poisson's ratio*), tulangan polos umumnya tidak dianjurkan untuk digunakan sebagai tulangan pokok dan jika digunakan sebagai tulangan pokok maka tulangan harus diangkur atau dibengkokkan pada ujung-ujungnya. Tulangan pokok dianjurkan menggunakan tulangan ulir.

Atorod Azizinamini John J. Roller, and S. K. Ghosh, 1993 dan Kemp & Wang, (1981) mengatakan pada tulangan ulir (*deformed bar*), lekatan dibentuk oleh *adhesi*, *friksi* dan *interlocking*. Kontribusi terbesar dalam pembentukan lekatan antara beton dan tulangan didominasi oleh *interlocking* antara matriks beton dan ulir tulangan. Peranan *adhesi* dan *friksi* sangat kecil, sehingga pengaruh kedua faktor ini biasanya diabaikan meskipun *adhesi* dan *friksi* ikut berperan pada saat awal pembebanan, namun mekanisme *adhesi* dan *friksi* ini lebih cepat pengaruhnya pada saat mulai terjadi *slip*, sehingga pada akhirnya hanya tinggal mekanisme *interlocking* antara matriks beton dan tulangnya saja yang bekerja menyalurkan beban.

Tegangan tersebut mempunyai dua komponen tegangan yaitu tegangan *longitudinal* (sejajar sumbu tulangan) yang merupakan besarnya tegangan lekat efektif dan tegangan *radial* (tegak lurus sumbu tulangan), kedua tegangan ini bekerja pada bidang selimut tulangan. Kuat lekat antara beton dan baja tulangan akan berkurang apabila mendapat tegangan yang tinggi karena pada beton terjadi retak-retak. Hal ini apabila terus berlanjut akan dapat mengakibatkan 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 disekelilingnya kadang tidak mengakibatkan keruntuhan balok secara menyeluruh. Hal ini disebabkan karena

ujung-ujung baja tulangan masih berjangkar dengan kuat, sekalipun telah terjadi pemisahan diseluruh batang baja tulangan.



Gambar 5. Panjang penyaluran baja tulangan

Dasar utama teori panjang penyaluran adalah dengan memperhitungkan suatu baja tulangan yang ditanam di dalam masa beton. Sebuah gaya F diberikan pada baja tulangan tersebut. Gaya ini selanjutnya akan ditahan antara baja tulangan dengan beton di sekelilingnya. Tegangan lekat bekerja sepanjang baja tulangan yang tertanam di dalam masa beton, sehingga total gaya yang harus dilawan sebelum batang baja tercabut keluar dari masa beton adalah sebanding dengan luas selimut baja tulangan yang tertanam dikalikan dengan kuat lekat antara beton dengan baja tulangan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3.

Mengacu pada Gambar 2.3, dapat dirumuskan gaya tarik yang dapat ditahan oleh lekatan baja tulangan dengan beton. 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.

$$P = l_d \cdot \pi \cdot D \cdot \tau \dots\dots\dots (1)$$

Dengan mendistribusikan nilai $P = f_s \cdot A_b$ maka didapat persamaan :

$$A_b \cdot f_y = l_d \cdot \pi \cdot D \cdot \tau \dots\dots\dots (2)$$

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 .

$$A_b \cdot f_y = l_d \cdot \pi \cdot D \cdot \tau \dots\dots\dots (3)$$

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

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

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

dengan :

P = beban (N)

Ab = luas baja tulangan (mm²)

f_y = tegangan baja leleh (MPa)

D = diameter baja tulangan (mm)

l_d = panjang penyaluran (mm)

τ = tegangan lekat (MPa)

2.6 Sifat –Sifat Keruntuhan Lekatan

Mindess et al., (1994) mengatakan keruntuhan lekatan antara beton dan tulangan pada pengujian tegangan lekat, pada umumnya ditunjukkan oleh terjadinya salah satu dari berikut ini :

1. *Splitting failure*

Kondisi ini ditunjukkan adanya retak pada beton akibat tegangan tarik yang tidak bisa ditahan oleh *cover* beton, keruntuhan ini mengakibatkan menurunnya tegangan lekat antara beton dan tulangan.

2. *Pull out failure (slip)*

Merupakan suatu kondisi keruntuhan dimana besi tulangan tercabut dari dalam beton tanpa mengalami retak yang diakibatkan oleh komponen tegangan geser yang memecahkan beton diantara uliran tulangan

3. Keruntuhan tarik beton

Merupakan suatu kondisi dimana penampang beton tidak mampu menerima tegangan tarik yang disalurkan oleh tulangan.

4. Tulangan mencapai leleh dan akhirnya putus.

Kuat lekatan jauh lebih besar dari pada kuat putus tulangan, sehingga tulangan putus.

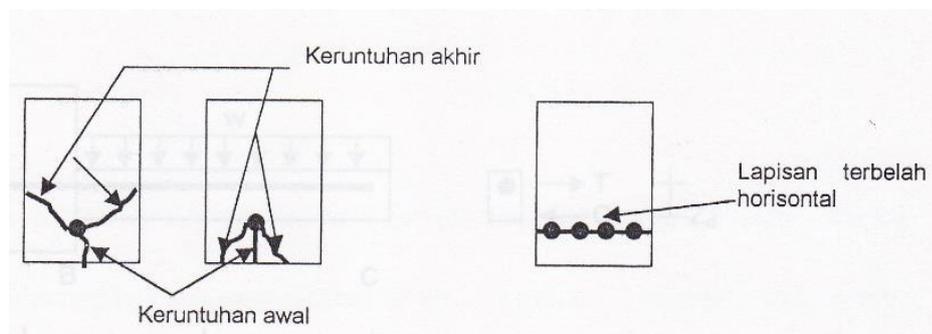
Penelitian terhadap sifat keruntuhan lekatan yang dilakukan terhadap bentuk tulangan dapat dikembangkan sebagai berikut :

1. Tulangan baja polos

Pada tulangan baja polos, lekatan yang terjadi adalah karena adanya adhesi antara beton dengan permukaan tulangan. Tegangan tarik pada baja walaupun relative kecil dapat mengakibatkan terjadinya *slip* yang cukup untuk menghilangkan adhesi pada lokasi yang berdekatan langsung dengan retak didalam beton. Susut juga dapat menimbulkan gesekan pada batang tulangan. Bila adhesi cukup tinggi tegangan tarik dapat mengakibatkan terlepasnya tulangan dari beton karena terbelah di arah memanjang. Sedangkan bila adhesi relatif rendah, tegangan tarik tulangan akan terlepas keluar meninggalkan lobang bulat dalam beton.

2. Tulangan baja deformasian (ulir)

Tulangan baja ulir lebih mengandalkan tahanan dari gerigi terhadap beton. Menurut Wang & Salmon, (1993) keruntuhan lekatan antara baja ulir dengan beton hampir selalu merupakan keruntuhan akibat terbelahnya penampang sekitar tulangan sebagai berikut,



Gambar 6. Bentuk kegagalan lekatan tulangan deformasian

2.7 Panjang Penyaluran Dasar l_d

Panjang penyaluran dibutuhkan karena adanya kecenderungan batang dengan tegangan yang sangat besar dapat membelah bagian yang tipis beton pembungkus. Sebuah tulangan tunggal yang tertanam pada beton masif seharusnya tidak memerlukan panjang penyaluran yang besar, walaupun demikian sebaris tulangan, bahkan didalam beton massif, dapat membuat suatu perlemahan bidang dengan

pembelahan beton (*splitting*) arah longitudinal di sepanjang bidang tulangan. Panjang penyaluran dasar l_d merupakan suatu fungsi dari ukuran (dimensi) dan tegangan leleh tulangan yang sangat menentukan ketahanan tulangan untuk terjadinya *slip*. Kuat lekat beton τ adalah suatu fungsi dari kuat tekan beton. Hubungan antara kuat tekan beton dengan kuat lekat dapat dilihat pada rumus dibawah ini:

$$\tau = k\sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

τ = kuat lekat beton (MPa)

f'_c = kuat tekan beton

k = koefisien

Untuk menentukan panjang penyaluran dasar l_d digunakan rumus sebagai berikut:

$$l_d = k \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} Ab \dots\dots\dots (8)$$

Dimana :

l_d = panjang penyaluran l_d (mm)

f_y = tegangan leleh tulangan (MPa)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

Ab = luas tulangan (mm²)

k = koefisien hubungan antara kuat lekat dengan kuat tekan beton

$$K_1 = \frac{\sqrt{f'_c}}{\pi D \tau} \dots\dots\dots (9)$$

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 factor reduksi ϕ
- d. Nilai $\sqrt{f'c}$ yang digunakan untuk menghitung panjang penyaluran tidak boleh lebih dari 8,3 MPa.

Pada panyaluran batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik terdapat ketentuan yaitu dua tingkatan pendekatan atau perhitungan tarik panjang penyaluran.

1. Panjang penyaluran ℓ_d untuk batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik harus yang terbesar dari syarat berikut,
 - a. Panjang yang dihitung sesuai dengan Tabel 3 atau sesuai dengan persamaan (10), (11) dengan menggunakan factor modifikasi yang berlaku pada Tabel 4,
 - b. 300 mm.
2. Untuk batang ulir atau kawat ulir, ℓ_d harus dihitung berdasarkan Tabel 3

Tabel 3. Panjang Penyaluran Batang Ulir dan Kawat Ulir dalam Kondisi Tarik

Spasi dan Selimut	Batang D19 dan yang lebih kecil dan kawat ulir	Batang D22 dan yang lebih besar
Spasi bersih batang atau kawat yang disalurkan atau disambung lewatkan tidak kurang dari d_b , selimut beton paling sedikit d_b , dan sengkang atau sengkang ikat sepanjang l_d tidak kurang dari standar minimum atau spasi bersih batang atau kawat yang disalurkan atau disambung lewatkan paling sedikit $2d_b$ dan selimut beton paling sedikit d_b	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{2,1 \lambda \sqrt{f'c}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,7 \lambda \sqrt{f'c}} \right) d_b$
Kasus-kasus lainnya	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,4 \lambda \sqrt{f'c}} \right) d_b$	$\left(\frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{1,1 \lambda \sqrt{f'c}} \right) d_b$

Sumber : SNI 2847-2019

3. Untuk batang ulir dan kawat ulir, ℓ_d harus dihitung dengan

$$\ell_d = \left(\frac{f_y}{1,1 \lambda \sqrt{f'c}} \frac{\Psi_t \Psi_e}{\left(\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \right)} \right) d_b \dots\dots\dots(10)$$

Dimana nilai $(c_b + K_{tr})/d_b$ tidak boleh diambil lebih besar dari 2,5 dan

$$K_{tr} = \frac{40 A_{tr}}{sn} \dots\dots\dots(11)$$

Dimana n adalah jumlah batang atau kawat yang disalurkan atau disambung lewatkan di sepanjang bidang pembelahan. Diizinkan untuk menggunakan $k_{tr} = 0$ sebagai penyederhanaan desain walaupun terdapat tulangan transversal.

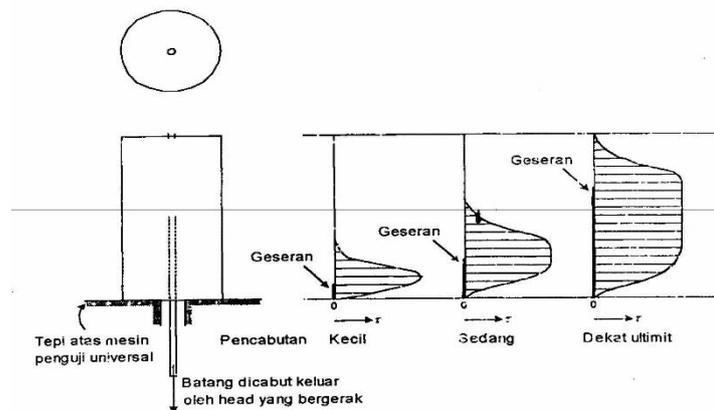
4. Untuk perhitungan ℓ_d , factor modifikasi harus sesuai dengan Tabel 3

Tabel 4. Faktor Modifikasi untuk panjang penyaluran batang ulir dan kawat ulir dalam kondisi tarik

Faktor Modifikasi	Kondisi	Faktor
Beton Ringan λ	Beton Ringan	0,75
	Beton Ringan, bila f_{ct} ditentukan	Sesuai dengan 19.2.4.3
	Beton normal	1,0
Epoksi Ψ_e	Tulangan dengan pelapis epoksi atau seng dan pelapis ganda epoksi dengan selimut bersih kurang dari $3d_b$ atau spasi	1,5
	Tulangan dengan pelapis epoksi atau seng dan pelapis ganda epoksi dengan kondisi lainnya	1,2
	Tulangan tanpa pelapis atau pelapis seng (galvanis)	1,0
Ukuran Ψ_s	Batang D22 dan yang lebih besar	1,0
	Batang D19 dan yang lebih kecil dan kawat ulir	0,8
Posisi Pengecoran Ψ_t	Lebih dari 30 mm beton segar diletakkan dibawah tulangan horizontal	1,3
	Lainnya	1,0

Sumber : SNI 2847-2019

2.8 Pengujian Pencabutan Keluar Pelekatan



Gambar 7. Pengujian Pencabutan Keluar Pelekatan, Dengan Distribusi-Distribusi Tegangan Pelekatan.

Suatu batang ditanamkan dalam sebuah silinder dari beton dan gaya yang dibutuhkan untuk mencabut batang itu keluar atau membuatnya bergeser secara berlebihan diukur. Dalam gambar diperlihatkan rambatan sesar dan tegangan lekat pada pengujian pencabutan keluar pelekatan (*Bond Pull-out Test*). Dari gambar tersebut tampak bahwa sesar antara baja tulangan dan beton merambat dari ujung yang dibebani ke bagian ujung yang tak dibebani (Ferguson, 1986).

2.9 Hubungan Panjang Penyaluran Terhadap Tegangan Lekat

Panjang penyaluran adalah panjang yang diperlukan untuk mengembangkan tegangan baja hingga mencapai tegangan leleh, merupakan fungsi dari tegangan leleh, diameter, dan tegangan lekat baja tulangan dengan beton. Panjang penyaluran menentukan tahanan terhadap tergelincirnya tulangan dari ikatan dengan beton. Agar batang dapat menyalurkan gaya sepenuhnya melalui ikatan, maka baja harus tertanam di dalam beton hingga suatu kedalaman tertentu yang dinyatakan dengan panjang penyaluran.

Sehingga dalam perencanaan panjang penyaluran di gunakan tegangan lekat saat baja tulangan mencapai luluh. Sedangkan tegangan lekat bervariasi saat baja tulangan mencapai luluh dengan diameter yang sama. Ini disebabkan oleh luas bidang kontak baja tulangan dengan beton juga bervariasi, sedangkan gaya yang di butuhkan untuk mencapai baja tulangan hingga luluh relatif sama untuk setiap baja tulangan dengan diameter yang sama.

2.10 Studi Empirik Penelitian Terdahulu

2.10.1 Kuat Lekat dan Kekangan pada Beton Bertulang (*Bond Strength and confinement in reinforced Concrete*), Mak & Lees, 2022 .

Penilaian kekuatan struktur beton bertulang yang ada menjadi tantangan ketika terjadi deteriorasi dan kekurangan detail. Pengangkuran tulangan baja internal dapat menjadi kritis di bawah kondisi pengekangan tertentu dari tekanan eksternal, penutup beton dan tulangan melintang. Interaksi antara kontribusi pengurangan yang berbeda dan efeknya pada lekatan diselidiki dengan pengaturan eksperimental baru yang menghilangkan tekanan dukungan parasit. Dengan tulangan transversal yang signifikan dan penutup beton yang bervariasi, kekuatan lekatan maksimum diperoleh untuk rasio penutup-ke-diameter menengah. Kontribusi tulangan transversal tergantung pada terjadinya retak belah. Temuan ini dapat mengarah pada peningkatan strategi penilaian dan pemeliharaan.

Penelitian ini menyelidiki perilaku lekatan baja tulangan di bawah kondisi kurungan eksternal dan internal tertentu. Kondisi ini tipikal dalam konfigurasi struktural kritis seperti setengah sambungan beton bertulang. Sebanyak 36 benda uji lekatan kantilever setengah sambungan eksentrik dilakukan pada batang baja longitudinal yang tertanam dalam spesimen beton, mengadopsi geometri baru yang baru-baru ini dikembangkan. Batang baja terdeformasi diuji dengan tiga ukuran baja tulangan dengan diameter 10, 12 dan 16 mm. Baja tulangan transversal yang sama di semua spesimen. Jarak penutup bawah dan samping bervariasi. Efek berkurangnya penutup dengan adanya sengkang diselidiki untuk mempelajari pengaruh relatif kekangan dari beton dan tulangan melintang. Hasil penelitian menunjukkan dengan adanya tulangan pengekang melintang meningkatkan kekuatan lekatan baja tulangan dengan beton sesuai dengan penyelesaian empiris atau analitis untuk beton polos berdasarkan analisis *Thick Walled Cylinder* dan sebagian retak beton elastis. Namun, efek yang menguntungkan ini tidak cukup untuk menjangkar jeruji ketika tutupnya benar-benar hilang dan jeruji memanjang terbuka ke tengah laras. Secara umum, rasio selimut beton dan diameter tulangan (c/ϕ) yang lebih kecil, menyebabkan *splitting failure*, sedangkan nilai c/ϕ yang lebih besar menyebabkan *pull-out failure*. Dalam beberapa kasus, *splitting failure*

menunjukkan nilai *ultimate bond resistance* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *pull-out failure*. Ini terjadi dikarenakan kondisi selimut beton yang kecil dan tingginya kekuatan tulangan pengekangnya.

2.10.2 Sifat Mekanis, Kapasitas Dampak Energi, dan Ketahanan Ikatan beton yang mengandung bubuk kaca limbah (*Mechanical Properties, Energy Impact Capacity and Bond Resistance of concrete incorporating waste glass powder*), Ubeid et al., 2020 .

Penelitian ini mengkaji tentang pengaruh limbah kaca sebagai bubuk sebagai pengganti sebagian semen pada beberapa sifat beton. Sifat-sifat ini termasuk kekuatan tekan, kekuatan tarik belah dan lentur, ketahanan benturan dan kekuatan ikatan. Pengaruh kaca sebagai serbuk diperiksa dibandingkan dengan spesimen kontrol tanpa penggantian serbuk kaca. Tiga persentase diuji: 0% (kontrol), 10 dan 15%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kaca meningkatkan sifat beton pada berbagai jenis pembebanan. Kuat tekan meningkat sebesar 26,34% dan 22% jika dibandingkan dengan campuran kontrol untuk serbuk kaca 10% dan 15%. Sedangkan kuat tarik belah meningkat 23,5% dan 28,7% lebih banyak dibandingkan campuran kontrol untuk serbuk kaca 10% dan 15%. Dan modulus pecah meningkat masing-masing sebesar 17% dan 10% untuk 10% dan 15% bubuk kaca. Resistensi benturan campuran 10% dan 15% bubuk kaca masing-masing meningkat sebesar 14,3% dan 4,76% pada kompresi dengan campuran kontrol. Akhirnya serbuk kaca juga meningkatkan kekuatan ikatan dimana kekuatan ikatan akhir meningkat sebesar 4,7 % dan 6,2 % masing-masing untuk serbuk kaca 10% dan 15%. Kemudian pemanfaatan limbah kaca sebagai bubuk beton mengurangi jumlah semen dan meningkatkan ketahanannya terhadap beban.

2.10.3 Pengaruh Serbuk Kaca terhadap Kekuatan Rekat pada Beton Bertulang (*Effect of Glass Powder on Bond Strength in Reinforced Concrete*), Shinde et al., 2019 .

Kekuatan lekatan memainkan peran utama dalam kinerja struktural elemen Beton Bertulang (*Reinforced Concrete*). Kuat tekan dan tarik beton konvensional; mempengaruhi kekuatan ikatan elemen RC. Serbuk kaca dengan ukuran partikel

kurang dari 75 mikron bila digunakan sebagai bahan pengganti semen; meningkatkan kuat tekan dan tarik beton. Dalam penelitian ini umenyelidiki pengaruh serbuk kaca sebagai bahan pengganti semen pada kuat tekan dan tarik beton dan ikatan lekatan pada beton bertulang. Persentase penggantian digunakan menjadi 0% hingga 30% dengan kenaikan sebesar 10%. Kuat tekan beton umur 28 hari meningkat seiring dengan persentase penggantian semen dengan serbuk kaca hingga 25% dan selanjutnya menurun pada persentase 30%. Nilai kuat tarik belah juga meningkat seiring dengan persentase penggantian semen dengan serbuk kaca hingga 25% dan selanjutnya menurun pada persentase 30%. Selanjutnya, nilai kuat lekatan pun meningkat seiring dengan persentase penggantian semen dengan serbuk kaca hingga 25% dan selanjutnya menurun pada persentase 30%

2.10.4 Pengaruh Penggantian Semen dengan Limbah Gelas terhadap Sifat Mekanik Beton (Influence of Replacing Cement with Waste Glass on Mechanical Properties of Concrete) Zeybek et al., 2022 .

Dalam penelitian ini pengaruh limbah kaca terhadap sifat mekanik beton diuji dengan melakukan serangkaian pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur. Sesuai dengan tujuan ini, limbah bubuk kaca (WGP) pertama kali digunakan sebagai pengganti sebagian semen dan enam rasio WGP yang berbeda digunakan dalam produksi beton: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% . Untuk menguji efek gabungan dari rasio WGP yang berbeda pada kinerja beton, sampel campuran (10%, 20%, 30%) kemudian disiapkan dengan mengganti semen, dan agregat halus dan kasar dengan partikel WGP dan kaca pecah. Nilai workability dan slump beton yang dihasilkan dengan jumlah limbah kaca yang berbeda ditentukan pada beton segar, dan sifat-sifat ini dibandingkan dengan beton biasa. Untuk beton keras, spesimen kubik 150 mm x 150 mm x 150 mm dan spesimen silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm diuji untuk mengidentifikasi kuat tekan dan kuat tarik belah beton yang diproduksi dengan limbah kaca. Selanjutnya, dilakukan uji tekuk tiga titik pada sampel dengan dimensi 100 x 100 x 400 mm, dan panjang bentang 300 mm untuk mendapatkan perilaku lentur campuran yang berbeda. Berdasarkan hasil yang diperoleh, substitusi 20% WGP sebagai semen dapat dianggap sebagai dosis optimum. Di sisi lain, untuk beton yang diproduksi dengan

kombinasi WGP dan partikel kaca pecah, sifat mekanik meningkat hingga batas tertentu dan kemudian menurun karena kemampuan pengerjaan yang buruk. Dengan demikian, 10% dapat dianggap sebagai tingkat penggantian yang optimal, karena kaca limbah gabungan menunjukkan kekuatan yang jauh lebih tinggi dan sifat kemudahan pengerjaan yang lebih baik. Selanjutnya, analisis mikroskop elektron pemindaian (SEM) dilakukan untuk menyelidiki komposisi mikro. Adhesi yang baik diamati antara kaca limbah dan beton semen. Terakhir, persamaan empiris praktis telah dikembangkan untuk menentukan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton dengan jumlah limbah kaca yang berbeda. Alih-alih melakukan eksperimen, nilai kekuatan beton yang diproduksi dengan serbuk kaca ini dapat dengan mudah diperkirakan pada tahap desain dengan bantuan ekspresi yang diusulkan.

Tabel 5. Matriks Penelitian-Penelitian Terdahulu

Judul penelitian/ tahun	Peneliti/ negara	Metode penelitian	Pokok persoalan	Hasil Penelitian	Sumber
<i>Bond Strength and confinement in reinforced Concrete/ 2022</i>	Michele Win Tai Mak dan Janet M. Lees/ <i>United Kingdom</i>	Eksperimental	Penelitian ini menyelidiki pengaruh serbuk kaca sebagai bahan pengganti semen pada kuat tekan dan tarik beton dan ikatan lekatan pada beton bertulang.	adanya tulangan pengekang melintang meningkatkan kekuatan lekatan baja tulangan dengan beton. Secara umum, rasio selimut beton dan diameter tulangan (c/ϕ) yang lebih kecil, menyebabkan <i>splitting failure</i> , sedangkan nilai c/ϕ yang lebih besar menyebabkan <i>pull-out failure</i> .	<i>Construction and Building Material 355</i>
<i>Mechanical Properties, Energy Impact Capacity and Bond Resistance of concrete incorporating waste glass powder/ 2022</i>	Hassan S Ubeid, Sheelan Mahmoud Hama, Akram Shakir Mahmoud / <i>Iraq</i>	Eksperimental	Mengkaji tentang pengaruh limbah kaca sebagai bubuk sebagai pengganti sebagian semen pada beberapa sifat beton. Sifat-sifat ini termasuk kekuatan tekan, kekuatan tarik belah dan lentur, ketahanan benturan dan kekuatan ikatan.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kaca meningkatkan sifat beton pada berbagai jenis pengujian. Serbuk kaca juga meningkatkan kekuatan ikatan dimana kekuatan ikatan akhir meningkat sebesar 4,7 % dan 6,2 % masing-masing untuk serbuk kaca 10% dan 15%.	<i>IOP Conference Series : Material Science and Engineering 745</i>

Lanjutan Tabel 5. Matriks Penelitian-Penelitian Terdahulu

Judul penelitian/ tahun	Peneliti/ negara	Metode penelitian	Pokok persoalan	Hasil Penelitian	Sumber
<i>Effect of Glass Powder on Bond Strength in Reinforced Concrete</i> , 2019	Tejashri Shinde, Katkade, Shubham Thorat, Jaywant Nimbalkar, Shivsiddha Somawanshi/ India	Eksperimental	Penelitian ini menyelidiki perilaku lekatan baja tulangan di bawah kondisi kurungan eksternal dan internal tertentu.	Nilai kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lekat beton pada umur 28 hari meningkat seiring dengan persentase penggantian semen dengan serbuk kaca hingga 25% dan selanjutnya menurun pada persentase 30%.	<i>International Journal Science Research and Science Engineering Technology</i> 6(3)
<i>Influence of Replacing Cement with Waste Glass on Mechanical Properties of Concrete</i> , 2022	Özer Zeybek, Yasin Onuralp Özkılıç, Memduh Karalar, Ali İhsan Çelik, Shaker Qaidi, Jawad Ahmad, Dumitru Doru Burduhos-Nergis and Diana Petronela Burduhos-Nergis / Turkey, Iraq, Pakistan, Romania	Eksperimental	Untuk mengetahui efek gabungan dari rasio WGP (<i>Waste Glass Powder</i>) yang berbeda pada kinerja beton, sampel campuran (10%, 20%, 30%) untuk penggantian semen, agregat halus dan kasar menggunakan baik serbuk kaca dan pecahan kaca.	Berdasarkan hasil yang diperoleh, substitusi 20% WGP sebagai semen dapat dianggap sebagai kadar optimum. Di sisi lain, untuk beton yang diproduksi dengan kombinasi WGP dan partikel kaca pecah, sifat mekanik meningkat hingga batas tertentu dan kemudian menurun karena kemampuan pengerjaan yang buruk. Dengan demikian, 10% dapat dianggap sebagai tingkat penggantian yang optimal, Selanjutnya, analisis SEM dilakukan untuk menyelidiki komposisi mikro. Adhesi yang baik diamati antara kaca limbah dan beton semen.	<i>Materials</i> 15