

TUGAS AKHIR

**PENGARUH JENIS FIBER PADA PANEL MORTAR
GEOPOLIMER UNTUK PERKUATAN GESER BALOK
BETON BERTULANG**

***THE EFFECT OF FIBER TYPE ON GEOPOLYMER MORTAR
PANELS FOR SHEAR STRENGTHENING REINFORCED
CONCRETE BEAMS***

**MUH. FIQIH HIDAYAT
D011 18 1004**



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
2023**

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

**PENGARUH JENIS FIBER PADA PANEL MORTAR GEOPOLIMER UNTUK
PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG**

Disusun dan diajukan oleh:

MUH. FIQIH HIDAYAT

D011 18 1004

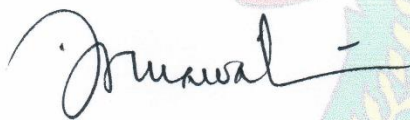
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

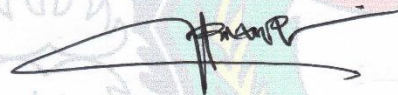
menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP: 197206192000122001



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

Ketua Program Studi,



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

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Muh. Fiqih Hidayat, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Pengaruh Jenis Fiber Pada Panel Mortar Geopolimer Untuk Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang”**, adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan 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.

Gowa, Januari 2023

Yang membuat pernyataan,



Muh. Fiqih Hidayat
NIM: D011 18 1004

KATA PENGANTAR

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

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

1. **Bapak Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.**, selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
3. **Ibu Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.**, selaku dosen pembimbing I dan **Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. **Bapak Dr. Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, S.T., M.T.**, selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.

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

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Syahrir** dan ibunda **Hadrah** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu.
2. **Fathur** dan **Ira** sebagai saudara dan teman seumur hidup yang selalu memberikan banyak warna dan dukungan dalam hidup penulis.
3. **Hari, Radix, Innah dan Yusril** selaku partner dalam penelitian ini, yang selalu membantu dan menjadi teman berdiskusi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur**, terkhusus **Fikri, Radix, Riswand, Wana, Yuyun, Kinah, dan Fitri**. Terima kasih karena telah menjadi teman berdiskusi yang baik dan telah menghidupkan suasana mukim perkuatan serta membuat penulisan tugas akhir ini menjadi sangat menyenangkan.
5. **Keluarga Warna-Warni** sebagai teman pertama penulis di dunia perkuliahan yang selalu memberikan semangat hingga sekarang.
6. **Nadia, Fikri, Hari, Hikari, Yusril** sebagai rekan kerja di Laboratorium Struktur dan Bahan. Terima kasih untuk semua pengalaman kerja yang sangat berkesan selama penulis berkuliah di teknik sipil.
7. **Bapak Jasman** dan **Bapak Zultan** selaku mahasiswa S3 yang telah banyak membantu selama proses penelitian.
8. Kanda **Teguh Priono, S.T.** yang selalu memberikan banyak ilmu dan pengetahuan baru, serta senantiasa memberikan dorongan kepada penulis untuk terus meningkatkan kualitas yang dimiliki penulis.

9. Saudara-saudari **TRANSISI 2019**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2018** yang memberikan begitu banyak warna dan pengalaman yang sangat berharga dari awal hingga akhir nanti.

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

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

Gowa, Januari 2023

Penulis

ABSTRAK

Bangunan yang mengalami kerusakan harus dapat secepatnya difungsikan kembali, sehingga perlu penanganan terhadap kerusakan-kerusakan tersebut, baik dengan perbaikan maupun perkuatan. Terdapat beberapa jenis perkuatan yang umum digunakan, antara lain *Fiber Reinforced Polimer (FRP)*, plat baja eksternal, dan *Concrete Jacketing*. Namun, metode tersebut masih memiliki beberapa kekurangan. Oleh karena itu diusulkan metode perkuatan menggunakan panel mortar *geopolymer*. Untuk mengatasi sifat getas pada beton *geopolymer*, maka perlu adanya penambahan serat. Pada umumnya, serat yang digunakan pada mortar *geopolymer* berupa serat berbahan sintetis. Bahan sintetis sulit untuk didaur ulang atau digunakan kembali dan dapat mempengaruhi kesehatan manusia ketika proses produksi dan penggunaan. Oleh karena itu digunakan material alami berupa serat abaka sebagai alternatif pengganti serat sintetis untuk mengatasi masalah tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku geser serta pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat PVA dan panel mortar *geopolymer* serat abaka. Perilaku geser didiskusikan berdasarkan perilaku beban-lendutan, beban maksimum, beban-regangan baja, dan beban-regangan beton.

Tahapan penelitian terbagi atas dua yaitu pengujian kuat tekan mortar *geopolymer* dan pengujian geser balok beton bertulang. Pengujian kuat tekan mortar *geopolymer* serat PVA dan serat abaka masing-masing menggunakan sampel kubus 50x50x50 mm, diuji pada umur 3, 7, dan 28 hari. Mortar *geopolymer* dibuat dengan bahan dasar *fly ash* serta aktivator berupa Natrium Hidroksida dan Natrium Silikat. Sementara itu, pengujian geser balok menggunakan sampel balok 150x300 mm dengan panjang 2300 mm sebanyak 3 buah yang terdiri dari balok kontrol, balok dengan perkuatan mortar *geopolymer* serat PVA, serta balok dengan perkuatan mortar *geopolymer* serat abaka masing masing sebanyak 1 buah.

Hasil penelitian menunjukkan penggunaan serat abaka pada panel mortar *geopolymer* dapat meningkatkan beban maksimum dan kekakuan pada balok. Dari mode kegagalan, balok yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat abaka mengalami kegagalan geser

Kata kunci: Perkuatan, panel mortar, geopolimer, serat PVA, serat abaka

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	5
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian.....	6
E. Batasan Masalah	6
F. Sistematika Penulisan	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	10
A. Penelitian Terdahulu	10
B. Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang.....	16
C. Retak Pada Balok Beton Bertulang	20
D. Mortar Geopolimer	24
E. Material Penyusun Mortar Geopolimer	27
E.1. <i>Fly Ash</i>	27
E.2. Aktivator	29
E.4. <i>Superplasticizer</i>	31
E.5. Boraks.....	32
F. Serat PVA	32
G. Serat Abaka	34
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	37
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	37

B. Bagan Alir Penelitian	37
C. Alat dan Bahan Penelitian	38
C.1. Pengujian karakteristik mekanis mortar	38
C.2. Pengujian karakteristik mekanis tulangan.....	40
C.3. Pengujian karakteristik mekanis beton	41
C.4. Pengujian geser balok.....	41
D. Benda Uji	44
D.1. Panel Mortar <i>Geopolymer</i>	44
D.2. Pengujian Geser balok	53
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	59
A. Kuat Tekan Mortar Geopolimer	59
B. Kuat Tarik Belah Mortar <i>Geopolymer</i>	62
C. Karakteristik Mekanis Beton	64
D. Karakteristik Mekanis Tulangan.....	65
E. Pengujian Geser Balok.....	67
E.1 Hubungan Beban Lendutan	67
E.2 Beban Maksimum	71
E.3 Hubungan Beban-Regangan.....	73
F. Pola Retak dan Mode Kegagalan	76
F.1 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok CB	76
F.2 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok GM-PVA-200	78
F.3 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok GM-A-200	82
G. Perbandingan Hasil Teoritis dan Eksperimental	86
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	90
A. Kesimpulan	90
B. Saran	90
DAFTAR PUSTAKA.....	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Perkuatan geser balok beton bertulang dengan HCPs serta CFRP dengan teknik <i>Near Surface Mounted</i> (NSM)	10
Gambar 2. Pola retak balok yang diperkuat dengan HCPs	12
Gambar 3. Balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja	12
Gambar 4. <i>Setup</i> pengujian lentur balok	13
Gambar 5. Modus kegagalan dan pola retak dari balok yang diuji	15
Gambar 6. Perlawanan terhadap geseran	17
Gambar 7. Perlawanan terhadap geseran setelah penambahan panel perkuatan	20
Gambar 8. Jenis retakan pada beton	22
Gambar 9. Ikatan polimerisasi pada geopolimer	24
Gambar 10. Serat PVA	33
Gambar 11. Serat abaka	36
Gambar 12. Diagram alir pengujian kuat tekan mortar geopolimer	37
Gambar 13. Diagram alir pengujian geser balok	38
Gambar 14. Dimensi benda uji	40
Gambar 15. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM)	40
Gambar 16. Dimensi benda uji silinder	41
Gambar 17. LVDT	42
Gambar 18. <i>Strain gauge</i> baja dan <i>CN Adhesive</i>	42
Gambar 19. Alat ukur regangan beton (<i>Strain gauge</i> beton) dan <i>CN-E Adhesive</i>	43
Gambar 20. Alat <i>load cell</i> dan <i>data logger</i>	43
Gambar 21. Komposisi mortar geopolimer	45
Gambar 22. Partikel <i>fly ash</i> hasil pengujian SEM	46
Gambar 23. NYCON-PVA RECS 15	48
Gambar 24. Bagan alir proses perlakuan serat abaka	49
Gambar 25. Proses perlakuan serat abaka	49
Gambar 26. Material yang digunakan	51

Gambar 27. Pengadukan campuran pada <i>mixer</i>	51
Gambar 28. Uji mortar flow	51
Gambar 29. Pembuatan panel mortar geopolimer	52
Gambar 30. Benda uji kubus	53
Gambar 31. Dimensi benda uji balok	54
Gambar 32. Pabrikasi benda uji balok beton bertulang	55
Gambar 33. Sketsa gambar jarak antar baut pada panel	56
Gambar 34. Pemasangan panel mortar pada balok beton bertulang	56
Gambar 35. Pemasangan baut dengan <i>wrench</i> (kunci)	57
Gambar 36. <i>Setup</i> benda uji	57
Gambar 37. Posisi <i>strain gauge</i>	58
Gambar 38. Penimbangan benda uji	59
Gambar 39. Pengujian kuat tekan.....	59
Gambar 40. Kuat tekan mortar geopolimer serat PVA dan mortar geopolimer abaka	61
Gambar 41. Penimbangan benda uji	62
Gambar 42. Pengujian kuat tarik belah	62
Gambar 43. Uji kuat tekan	64
Gambar 44. Uji tarik tulangan baja.....	66
Gambar 45. Hubungan beban-lendutan variasi.....	68
Gambar 46. Beban maksimum	72
Gambar 47. Hubungan Beban-Regangan Tulangan Tarik	73
Gambar 48. Hubungan Beban-Regangan Tulangan Geser	74
Gambar 49. Hubungan Beban-Regangan Beton	75
Gambar 50. Pola retak pada balok kontrol (CB).....	77
Gambar 51. Retak awal balok kontrol (CB)	77
Gambar 52. Retak awal daerah geser	77
Gambar 53. Retak utama pada balok CB	78
Gambar 54. Pola Retak dan Model Kegagalan Balok GM-PVA-200 Sebelum Panel Dilepas	78

Gambar 55. Pola Retak dan Model Kegagalan Balok GM-PVA-200 Setelah Panel Dilepas	79
Gambar 56. Retak Awal pada balok GM-PVA-200	79
Gambar 57. Retak pada panel mortar <i>geopolymer</i>	80
Gambar 58. Bentang Geser Balok Beton Bertulang Setelah Panel dilepas	81
Gambar 59. Kehancuran beton pada sisi tekan	82
Gambar 60. Pola Retak Dan Model kegagalan balok GM-A-200 sebelum panel dilepas	82
Gambar 61. Pola Retak dan Model kegagalan balok GM-A-200 setelah panel dilepas	83
Gambar 62. Retak Awal pada balok GM-PVA-200	83
Gambar 63. Retak awal pada panel GM-A-200	85
Gambar 64. Bentang Geser Balok Beton Bertulang Setelah Panel dilepas	85

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Lebar retak maksimum yang diizinkan	23
Tabel 2. Karakter Fisik PVA (Ogur, 2005)	33
Tabel 3. Komposisi kimia <i>fly ash</i> (persen terhadap berat)	45
Tabel 4. Klasifikasi <i>fly ash</i> berdasarkan ASTM C 618-19	45
Tabel 5. Properti dari Serat PVA	48
Tabel 6. Komposisi campuran mortar geopolimer	50
Tabel 7. Variasi benda uji mortar geopolimer	53
Tabel 8. Variasi benda uji balok	53
Tabel 9. Mix desain beton normal per m ³	54
Tabel 10. Hasil pengujian kuat tekan Mortar Geopolimer Serat PVA pada umur 3, 7 dan 28 hari	60
Tabel 11. Hasil pengujian kuat tekan Mortar Geopolimer Serat Abaka pada umur 3, 7 dan 28 hari	60
Tabel 12. Hasil pengujian tarik belah Mortar Geopolimer Serat PVA pada umur 28 hari	63
Tabel 13. Hasil pengujian tarik belah Mortar Geopolimer Serat Abaka pada umur 28 hari	63
Tabel 14. Hasil pengujian kuat tekan beton umur 28 hari	65
Tabel 15. Hasil pengujian kuat tarik baja	66
Tabel 16. Rekapitulasi Hubungan Beban-Lendutan	69
Tabel 17. Kontribusi kapasitas geser balok beton bertulang	72
Tabel 18. Rekapitulasi perbandingan kapasitas geser eksperimen dan analitis	88

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Dalam usaha memenuhi kebutuhan infrastruktur bangunan gedung yang baik, keselamatan pengguna bangunan terhadap bahaya keruntuhan bangunan merupakan prioritas utama. Penambahan beban pada bangunan diluar beban rencana sebagai akibat perubahan fungsi bangunan baik disengaja maupun tanpa disengaja sering menimbulkan bencana keruntuhan bangunan. Sehingga diperlukan evaluasi kekuatan struktur bangunan pada kondisi existing dan perkuatan (strengthening) bila diperlukan sebelum struktur diberi beban yang baru.

Perkuatan diterapkan pada struktur atau komponen struktur yang belum rusak, agar didapatkan kapasitas yang lebih besar dalam mendukung beban tambahan akibat perubahan fungsi bangunan. Perkuatan struktur biasanya dilakukan sebagai upaya pencegahan sebelum struktur mengalami kerusakan/kegagalan. Perkuatan atau perbaikan struktur diperlukan apabila terjadi kerusakan yang menyebabkan degradasi yang berakibat tidak terpenuhi lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat Teknik yaitu kekuatan, kekakuan dan daktilitas, kestabilan, serta ketahanan terhadap kinerja tertentu (Triwiyono, 1998)

Terdapat beberapa metode perkuatan yang sering digunakan, salah satu metode perkuatan yang telah ada yaitu metode pelapisan pelat baja eksternal yang memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan

struktural, tetapi memiliki kekurangan berupa korosi. Metode perkuatan lain yaitu perkuatan dengan *Fibre Reinforced Polymer* (FRP). Dibandingkan dengan metode perkuatan konvensional, ia memiliki keuntungan yang jelas dalam hal ketahanan korosi, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan dalam pengaplikasian, dan meminimalkan perubahan geometri. Namun, karena ketahanannya yang buruk terhadap paparan suhu tinggi, aplikasi yang tidak efisien di lingkungan yang lembab, ketidakcocokan dengan substrat beton, dan kemungkinan kegagalan mendadak tanpa peringatan, bahan dianggap tidak efektif. Selain itu terdapat metode *Concrete Jacketing*. Metode ini memiliki beberapa kelebihan, antara lain mampu meningkatkan daktilitas dan kekuatan struktur (kapasitas aksial, kapasitas lentur, dan kemampuan geser). Adapun kurangan dari metode ini yaitu adanya penambahan beban akibat penambahan volume beton dan tulangan, selain itu jika penempatan *concrete jacketing* ini tidak diperhatikan dengan baik maka dapat menyebabkan kekakuan yang tidak merata. Sehingga metode perkuatan baru diusulkan dengan menggunakan panel mortar *geopolymer* untuk menutupi kekurangan metode perkuatan yang telah ada sebelumnya.

Mortar pada umumnya diproduksi menggunakan material semen sebagai bahan pengikat utama. Namun industri produksi semen ini dapat meningkatkan produksi gas CO₂ yang dikenal emisi gas rumah kaca. Menurut Malhotra, V.M., (2002), produksi satu ton semen membebaskan sekitar satu ton CO₂ ke atmosfer. Tahun 2016, produksi semen dunia

menghasilkan sekitar 2,2 miliar ton CO₂, setara dengan kontribusi sekitar 8 % terhadap emisi gas karbon dioksida (CO₂) dunia, (Rodgers, L., 2018). Oleh karena itu diperlukan alternatif lain yang dapat menggantikan semen sebagai bahan pengikat.

Beton tanpa semen atau beton *geopolymer* merupakan beton geosintetik yang reaksi pengikatannya terjadi melalui reaksi polimerisasi dan bukan melalui reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional (Davidovits, 2005). Beton geopolimer mulai diperkenalkan sebagai beton ramah lingkungan sebagai solusi beton inovasi untuk mengurangi emisi CO₂ akibat penggunaan semen Portland. *Geopolymer* sendiri digambarkan sebagai material non-semen yang dibuat dari aluminosilikat pengaktif alkali termasuk limbah industri (abu terbang, terak tanur sembur) atau metakaolin pada suhu kalsinasi rendah. Akan tetapi, penggunaan mortar *geopolymer* ini memiliki kelemahan yaitu bersifat getas.

Penggunaan serat pada beton dapat memodifikasi perilaku beton yang bersifat getas menjadi lebih daktail. Beberapa penelitian telah dilakukan pada komposit geopolimer berbasis abu terbang diperkuat dengan berbagai serat termasuk plastic (*polypropylene*), *cotton*, kaca (*glass*), *Natural flax*, karbon (*carbon*), *basalt*, dan baja (*steel*). Salah satu jenis serat sintetik yang sering digunakan pada campuran adalah serat *Polyvinyl Alcohol (PVA)*. Serat PVA memiliki keunggulan berupa kuat tarik yang tinggi, modulus tinggi, elongasi rendah, ketahanan terhadap aus, asam, dan alkali, tahan cuaca yang baik, tidak beracun, tidak menimbulkan

polusi dan tidak merusak kulit manusia, serta tidak berbahaya bagi tubuh manusia. Namun dengan keunggulan tersebut, serat PVA memiliki harga yang mahal. Oleh sebab itu, diperlukan alternatif lain berupa serat alami yang tetap dapat menutup kekurangan dari mortar *geopolymer* tetapi memiliki kualitas yang baik dan harga yang terjangkau.

Studi penggunaan serat alami dalam campuran beton telah banyak dilakukan. Contohnya yaitu serat sabut kelapa dan serat eceng gondok yang cukup dalam meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat tarik beton. Adapun serat yang digunakan pada penelitian ini yaitu serat abaka. Serat abaka merupakan serat daun yang paling kuat, diikuti oleh sisal, phormium, dan henequen. Serat abaka yang memiliki kuat tarik yang bisa mencapai sebesar 717 MPa (Cai dkk, 2016). Selain itu serat ini memiliki ketahanan terhadap air, terutama air asin; dan itu digunakan untuk tali dan kabel laut dan merupakan serat pilihan untuk kantong teh karena kekuatan basahnya yang tinggi, kebersihan, dan strukturnya yang memungkinkan cepat difusi ekstraksi. Dalam penerapannya pada campuran beton, serat abaka mampu meningkatkan nilai kuat tarik dan mengubah sifat getas menjadi lebih daktail. Pada salah satu studi perkuatan struktur beton, serat abaka digunakan sebagai *Natural Fiber Reinforced Plastic (NFRP)* pada perkuatan struktur balok. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan mengeksplorasi penggunaan mortar *geopolymer* sebagai teknik perkuatan geser pada balok dengan menggunakan panel mortar *geopolymer* yang diangkur atau *anchored geopolymer mortar (GM)* dengan

tambahan serat dan wiremesh. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan kapasitas geser dari balok yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat PVA dan panel mortar *geopolymer* serat abaka.

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka penting dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental yaitu **“PENGARUH JENIS FIBER PADA PANEL MORTAR GEOPOLIMER UNTUK PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG”**.

B. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat PVA dan panel mortar *geopolymer* serat abaka?
2. Bagaimana pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat PVA dan panel mortar *geopolymer* serat abaka?

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat PVA dan panel mortar *geopolymer* serat abaka.

2. Menganalisis pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar *geopolymer* serat PVA dan panel mortar *geopolymer* serat abaka.

D. Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. *Fly ash* merupakan limbah *by product* yang terus mengalami peningkatan kuantitas untuk memenuhi kebutuhan industri. Disaat yang sama, penggunaan semen berdampak pada kerusakan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberi solusi dalam upaya pencegahan kerusakan lingkungan dan khususnya industri beton agar menjadi acuan dalam perencanaan beton ramah lingkungan berbasis *fly ash*.
2. Menjadi bahan referensi bagi peneliti dalam mengembangkan beton ramah lingkungan (*Green Concrete*) berbasis *fly ash*.

E. Batasan Masalah

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

1. Pengujian dilakukan terhadap sampel Balok Beton Bertulang yang diperkuat dengan Mortar Geopolimer, penambahan serat dan wiremesh.

2. Fly Ash kelas C sebagai pengganti semen berasal dari PLTU Bosowa, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia.
3. Serat yang digunakan adalah serat abaka dan serat PVA.
4. Kadar serat abaka dan serat PVA yang digunakan pada campuran sebesar 0.6% dari volume total campuran mortar geopolimer.
5. Serat abaka yang digunakan pada campuran mortar geopolimer berukuran ± 20 mm dan serat PVA dengan tipe NYCON-PVA RECS 15 dengan panjang 8 mm.
6. Mortar geopolimer diproduksi dengan mencampurkan *fly ash*, pasir, NaOH, Na_2SiO_3 , *superplasticizer*, dan boraks.
7. Penelitian ini menggunakan tebal pelat mortar geopolimer 15 mm.
8. Panel Mortar Geopolimer yang digunakan diberikan *wiremesh*.
9. Jarak antar baut pada panel sebesar 200 mm.
10. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer berdasarkan penambahan serat PVA dan serat abaka pada umur 3, 7, dan 28 hari.
11. Benda uji diberi beban lentur dengan beban dua titik secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 1500 kN.
12. Pembebanan hingga benda uji mengalami keretakan pada beban maksimum.

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah tulisan ini, sistematika penulisan yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga produk

yang dihasilkan lebih sistematis. Sistematika penulisan penelitian ini dapat diurutkan yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

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

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB III METODE PENELITIAN

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

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian diantaranya adalah hasil pengujian karakteristik mortar geopolimer dan pengujian lentur balok.

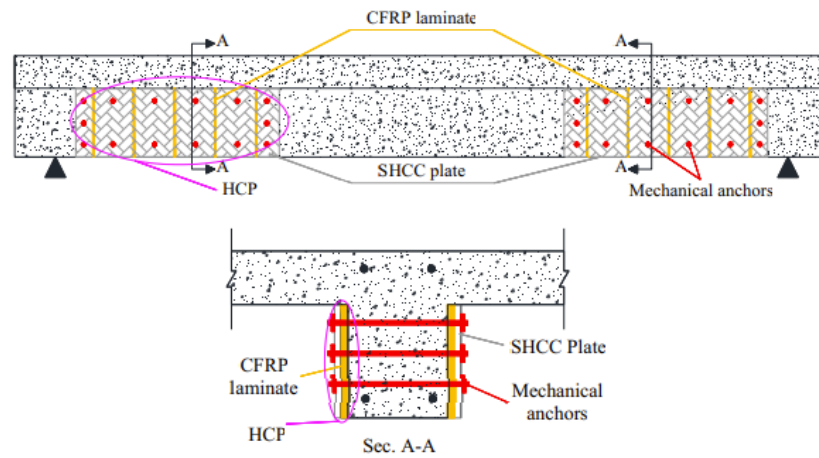
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

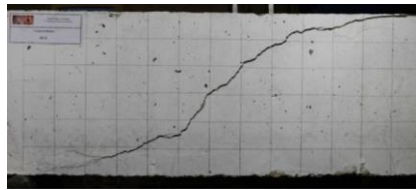
Baghi dkk. (2016) melakukan penelitian tentang perkuatan geser balok beton bertulang dengan teknik Hybrid Composite Plates (HCP). HCP adalah pelat tipis dari Strain Hardening Cementitious Composite (SHCC) yang diperkuat dengan laminasi Carbon Fiber Reinforcement Polymer (CFRP) yang diterapkan pada sisi balok beton bertulang sesuai dengan teknik Near Surface Mounted (NSM). Karena kondisi ikatan yang sangat baik antara laminasi SHCC dan CFRP, hal ini memberikan kapasitas kekuatan tarik yang diperlukan untuk HCP.



Gambar 1. Perkuatan geser balok beton bertulang dengan HCPs serta CFRP dengan teknik *Near Surface Mounted* (NSM)

Dua proses yang berbeda untuk menerapkan HCPs ke substrat beton balok diperiksa: (1) menggunakan perekat epoksi; dan (2) menggunakan angkur mekanis selain perekat epoxy. Kapasitas beban

maksimum balok yang diperkuat dengan HCPs adalah 105% dan 157% lebih tinggi dari yang sesuai balok penampang persegi panjang dan T, masing-masing, tanpa setiap penguatan geser (balok kontrol). Selain itu, hasil yang diperoleh menunjukkan efisiensi HCPs untuk geser memperbaiki balok beton bertulang yang rusak.



(a) Pola retak pada kegagalan balok R-C-R



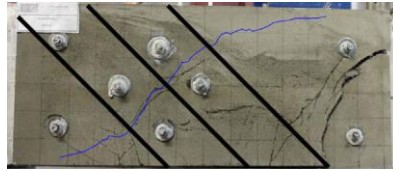
(b) Pola retak pada kegagalan balok R-75-R



(c) Pola retak pada kegagalan balok R-SP



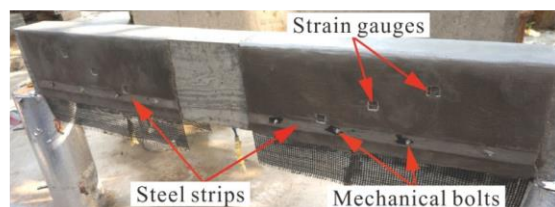
(d) Pola retak pada kegagalan balok R-NSM-4L 90



(e) Pola retak pada kegagalan pada permukaan lateral balok R-D-3L45-B

Gambar 2. Pola retak balok yang diperkuat dengan HCPs

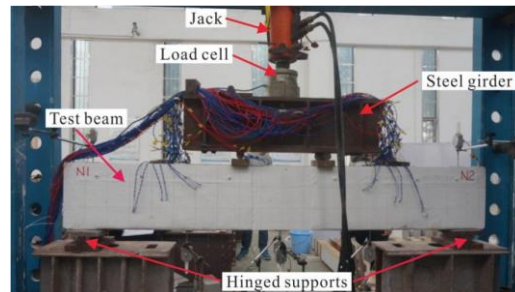
Zhang dkk. (2019) melakukan penelitian tentang perilaku mekanik perkuatan geser balok beton dengan mortar geopolimer perkuatan tekstil (*textile reinforced geopolymer mortar/TRGM*). Penelitian ini memperlihatkan hasil pengujian beban statik pada sepuluh balok beton bertulang, yang terdiri atas delapan balok perkuatan geser dengan mortar geopolimer perkuatan tekstil, satu balok perkuatan geser dengan tekstil dan resin *epoxy*, dan satu balok tanpa perkuatan. Gambar 3 menunjukkan balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja.



Gambar 3. Balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja

Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas geser pada satu dan dua lapisan dari perkuatan TRGM dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan masing-masing sebesar 47% dan 106%. Selain itu, kapasitas geser dapat meningkat 15-21% ketika angkur strip baja digabungkan. TRGM sangat dipercaya sebagai solusi dalam retrofit dan perkuatan beton bertulang, karena sangat tahan terhadap api, tahan

terhadap korosi, dan tahan cuaca yang baik. Gambar 4 menunjukkan *setup* pengujian lentur balok.



Gambar 4. *Setup* pengujian lentur balok

P. Zhang dkk., (2020) melakukan penelitian tentang sifat mekanik dan prediksi parameter rekahan mortar teraktivasi geopolimer/alkali yang dimodifikasi dengan serat PVA dan nano-SiO₂. Sampel yang digunakan berupa sampel kubus ukuran 70.7 x 70.7 x 70.7 mm. Penambahan serat PVA memiliki efek positif pada sifat mekanik terutama untuk kuat tekan dan kuat tarik, tetapi memiliki efek negatif pada *workability*. Pola perubahan umum kuat tekan dengan kandungan serat PVA adalah bahwa kekuatan pertama kali meningkat sampai kandungan serat mencapai 0,8% dan kemudian mulai menurun. Nilai puncak kuat tekan adalah 41,7 MPa untuk mortar yang diperkuat serat 0.8% tanpa nano-SiO₂, meningkat sebesar 29,1% dibandingkan dengan sampel kontrol. Mempertimbangkan peningkatan kekuatan tekan, modulus elastisitas, dan kekuatan tarik, kandungan serat PVA 0,6%-0.8% dianggap sebagai yang optimal.

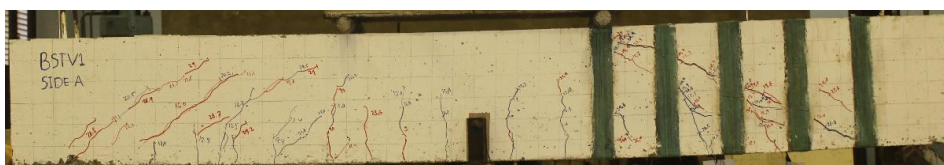
Malenab dkk (2017) melakukan penelitian tentang pengolahan kimia limbah abaka sebagai serat alami perkuatan komposit *geopolymer*. Dilakukan pengujian yaitu uji tarik serat abaka, *scanning electron*

microscopy-energy dispersive spectroscopy measurement, XRD measurement, uji kuat tekan dan uji lentur pada benda uji mortar geopolimer. Pengujian kuat tekan menggunakan sampel 50 mm x 50 mm x 50 mm. Hasil menunjukkan bahwa memasukkan serat abaka (sekitar 1% berat fly ash) dalam matriks geopolimer meningkatkan kuat tekan komposit yang diperkuat serat yang tidak diberi perlakuan (25,9 MPa) dan komposit yang diperkuat serat yang diberi perlakuan (22,2 MPa) masing-masing sebesar 20% dan 3%, dibandingkan dengan geopolimer murni (21,6 MPa). Demikian juga, kekuatan lentur dari serat yang diperkuat tanpa perlakuan (5,5 MPa) dan komposit serat yang diberi perlakuan (7,3 MPa) juga ditingkatkan masing-masing sebesar 95% dan 161%, dibandingkan dengan geopolimer murni (2,8 MPa). Hasil tersebut menunjukkan bahwa kontribusi utama serat adalah untuk meningkatkan terutama kekuatan lentur komposit dan tidak banyak dari kekuatan tekannya karena serat mengontrol retak yang menimbulkan fraktur "lemah" dengan menjembatani retakan.

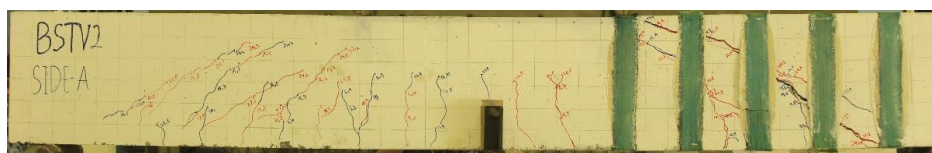
Penelitian yang dilakukan oleh P. Zhang dkk (2020) menunjukkan nilai kuat tekan untuk kandungan serat PVA 0% dan 0.6% berturut-turut sebesar 32,7 MPa dan 40,8 MPa dengan variasi serat 0%-1.2%. Sedangkan untuk nilai kuat tarik untuk kandungan serat PVA 0% dan 0.6% berturut-turut sebesar 5,8 MPa dan 7,1 MPa. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Utomo (2011) yang melakukan pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan tambahan serat abaka dengan variasi serat 0%-1%, didapatkan nilai kuat tekan untuk benda uji ukuran 50x50x50 mm³ untuk 0%

sebesar 14,5 MPa dan 0.6% sebesar 19.62 MPa. Selain itu, Purnama (2011) melakukan uji kuat tarik belah mortar geopolimer dengan tambahan serat abaka dengan variasi serat 0%-1%, didapatkan nilai kuat tarik untuk 0% sebesar 4.6 MPa dan 0.6% sebesar 4.8 MPa.

Saidi dkk. (2021) melakukan penelitian tentang pengaruh jumlah lapisan serat abaka sebagai bahan FRP alami untuk perkuatan geser balok beton bertulang. Dua balok diperkuat geser yang terikat secara eksternal dengan jumlah lapisan NFRP yang berbeda dan juga balok kontrol disiapkan. Pengujian dilakukan dengan menerapkan dua beban aksial pada balok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan satu lapisan dan dua lapisan komposit serat abaka sebagai bahan NFRP untuk balok yang diperkuat geser meningkat 9,78% dan 9,92% beban maksimum. Bahan NFRP komposit serat abaka berkontribusi masing-masing 11% dan 18,57% dari total beban geser maksimum untuk laminasi satu lapisan dan dua lapis masing-masing. Selain itu, perkuatan geser balok yang terikat secara eksternal mempengaruhi pola retak dan nilai defleksi.



(a) 1 Lapis NFRP



(b) 2 Lapis NFRP

Gambar 5. Modus kegagalan dan pola retak dari balok yang diuji

B. Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

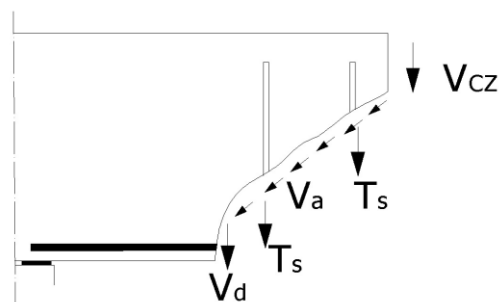
a) Kapasitas Geser Sebelum Penambahan Panel Perkuatan

Kejadian geser pada balok beton tanpa tulangan, umumnya kerusakan terjadi di daerah sepanjang kurang lebih tiga kali tinggi efektif balok dan dinamakan bentang geser. Retak akibat tarik diagonal merupakan salah satu cara terjadinya kerusakan geser. Pada bentang geser yang lebih pendek, kerusakan timbul akibat kombinasi dari pergeseran, remuk dan belah, sedangkan untuk balok tanpa tulangan geser dengan bentang geser lebih panjang, retak akibat tegangan tarik lentur akan terjadi terlebih dahulu sebelum retak karena tarik diagonal. Terjadinya retak tarik lenturan pada balok tanpa tulangan geser merupakan peringatan awal kerusakan geser.

Retak miring akibat geser di badan balok bertulang dapat terjadi tanpa disertai retak akibat lentur di sekitarnya, atau dapat juga sebagai kelanjutan retak lentur yang telah mendahuluinya. Retak miring pada balok yang sebelumnya tidak mengalami retak lentur dinamakan sebagai retak geser badan. Retak miring yang terjadi sebagai proses kelanjutan dari retak lentur yang timbul sebelumnya dinamakan sebagai retak geser lentur. Retak jenis terakhir ini dapat dijumpai pada balok beton bertulang biasa maupun prategang. Proses terjadinya retak lentur umumnya cenderung melambat dimulai dari tepi masuk kedalam balok dengan arah hampir tegak lurus. Proses tersebut terus berlanjut tanpa mengakibatkan berkurangnya tegangan sampai terjadinya suatu kombinasi kritis tegangan lentur dan

geser di ujung salah satu rekatan terdalam, yang terjadi tegangan geser cukup besar dan mengakibatkan terjadinya retak miring. Tulangan baja pada balok beton bertulang lentur arah memanjang bertugas sepenuhnya menahan gaya tarik yang timbul akibat lenturan. Apabila beban yang bekerja terus meningkat, tegangan tarik dan geser juga akan meningkat, tulangan baja yang diperuntukkan menahan momen lentur didalam balok letaknya tidak berada pada tempat terjadinya tegangan tarik diagonal, sehingga diperlukan tambahan tulangan baja untuk menahan tegangan tarik diagonal tersebut di tempat yang sesuai (Dipohusodo, 1994). Menurut Vis dan Kusuma (1995), pergeseran beton ditahan oleh:

1. Aksi pasak oleh tulangan memanjang (V_d)
2. Komponen vertikal gaya geser yang terdapat pada retak miring akibat permukaan retakan yang tidak teratur (menghindari butiran – butiran kerikil). Gaya geser (V_a) pada retak miring disebut “interlocking”
3. Komponen vertical gaya geser pada daerah tekan yang belum retak (V_{cz}).
4. Gaya (T_s) yang terdapat dalam tulangan geser



Gambar 6. Perlawanan terhadap geseran

5. Perencanaan penulangan geser menurut SNI 2847:2019 menggunakan persamaan:

$$\phi V_n \geq V_u \text{ atau } V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots (1)$$

dimana

V_u = gaya geser berfaktor (kN),

V_c = kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (kN),

V_s = kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN),

V_n = kekuatan geser nominal (kN),

ϕ = faktor reduksi.

Untuk komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja menggunakan persamaan:

$$V_n = \frac{1}{6} \sqrt{f'c} \cdot b_w \cdot d \dots\dots\dots (2)$$

Dimana,

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

b_w = Lebar balok (mm)

d = Tinggi efektif (mm)

Untuk gaya geser yang disumbangkan oleh sengkang vertikal (V_s) menggunakan persamaan:

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana,

A_v = Luas tulangan geser

s = Jarak pusat ke pusat batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok penampang (mm)

f_y = Kuat leleh tulangan geser (MPa).

Tetapi kuat geser V_s tidak boleh diambil lebih dari nilai

$$V_s = \left(\frac{2}{3}\right) \sqrt{f'c} b_w d \dots\dots\dots (4)$$

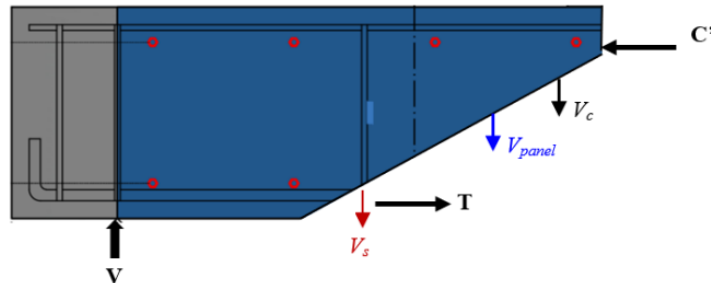
Untuk jarak tulangan geser yang dipasang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur tidak boleh melebihi $d/2$ untuk struktur non-prategang dan $(3/4) h$ untuk komponen struktur prategang, atau 600 mm. Ketentuan tulangan geser minimum dapat diabaikan bila dapat ditunjukkan dengan pengujian bahwa komponen struktur tersebut mampu mengembangkan kuat lentur dan geser nominal yang diperlukan tanpa adanya tulangan geser.

Bila hasil analisa diperlukan tulangan geser, maka luas tulangan geser minimum untuk komponen struktur nonprategang harus dihitung dengan persamaan dibawah.

$$A_v = \frac{75 \sqrt{f'c} b_w d}{(1200) f_y}$$

Tetapi A_v tidak boleh kurang dari $\frac{1 b_w s}{3 f_y}$, dengan b_w dan s dinyatakan dalam millimeter.

b). Kapasitas Geser Setelah Penambahan Panel Perkuatan



Gambar 7. Perlawanan terhadap geseran setelah penambahan panel perkuatan

Dengan adanya penambahan panel perkuatan, kontribusi dari kapasitas geser yang disumbangkan oleh panel perkuatan tersebut perlu diperhitungkan. Sehingga, persamaan (6) dapat ditulis menjadi

$$\phi V_n \geq V_u \text{ atau } V_n = V_c + V_s + V_p \quad \dots\dots\dots (6)$$

Dimana :

V_u = gaya geser berfaktor (kN),

V_c = kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (kN),

V_s = kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN),

V_p = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh Panel Perkuatan (kN)

V_n = kekuatan geser nominal (kN),

ϕ = faktor reduksi

C. Retak Pada Balok Beton Bertulang

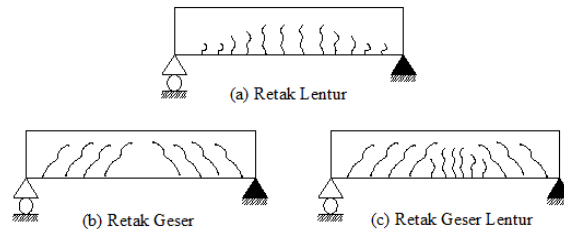
Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja

tersebut. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan.

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert & Mickleborough, 1990).

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok (lihat Gambar 9(a)). Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya. Jika balok memiliki web yang sangat tinggi, jarak retak akan sangat dekat, dengan sebagian retak terjadi bersamaan sampai di atas tulangan, dan sebagian lagi tidak sampai ke tulangan. Retak ini akan lebih lebar di pertengahan balok daripada di bagian dasarnya.
2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang di mana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil (lihat Gambar 9(b)). Retak miring dapat disebabkan karena gaya geser yang dapat terjadi pada bagian web balok beton bertulang baik sebagai retak bebas atau perpanjangan dari retak lentur. Retak geser web kadang-kadang dapat terjadi pada web-web penampang prategang, terutama dapat terjadi pada penampang dengan flens yang besar dan web yang tipis.
3. Retak geser-lentur (*flexural shear crack*), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi kerekatan lentur. Retak geser lentur

merupakan perambatan retak miring dan retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya.



Gambar 8. Jenis retakan pada beton

Apabila struktur dibebani dengan suatu beban yang menimbulkan momen lentur masih lebih kecil dari momen retak maka tegangan yang timbul masih lebih kecil dari *modulus of rupture* beton $f_r = 0,70 \sqrt{f_c}$. Apabila beban ditambah sehingga tegangan tarik mencapai f_r , maka retak kecil akan terjadi. Apabila tegangan tarik sudah lebih besar dari f_r , maka penampang akan retak.

Ada tiga kasus yang dipertimbangkan dalam masalah retak yaitu:

- Ketika tegangan tarik $f_t < f_r$, maka penampang dipertimbangkan untuk tidak terjadi retak. Untuk kasus ini $I_g = \frac{1}{12} b \cdot h^3$.
- Ketika tegangan tarik $f_t = f_r$, maka retak mulai timbul. Momen yang timbul disebut momen retak dan dihitung sebagai berikut:

$$M_{cr} = f_r \frac{I_g}{c}, \text{ dimana } c = \frac{h}{2}$$

- Apabila momen yang bekerja sudah lebih besar dari momen retak, maka retak penampang sudah meluas. Untuk perhitungan digunakan momen inersia retak (I_{cr}), transformasi balok beton yang tertekan, transformasi dan tulangan $n \cdot A_s$.

Beton bertulang akan mengalami retak yang disebabkan oleh kekuatan tarik beton yang cukup rendah. Retak tidak dapat dicegah dan dihindari namun dapat dibatasi ukurannya dengan menyebar atau mendistribusikan tulangan pada beton. Nilai lebar retak maksimum yang dapat diterima sangat bervariasi yaitu dari sekitar 0,004 sampai 0,016 dan nilai ini sangat tergantung pada lokasi terjadinya retak, jenis struktur, tekstur permukaan beton, iluminasi, dan faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi terjadinya retak pada balok beton bertulang.

Komite ACI 224, dalam laporannya tentang retak memperlihatkan sejumlah perkiraan lebar retak maksimum yang dapat diizinkan untuk batang beton bertulang dalam berbagai situasi dan kondisi yang terjadi seperti pada beton bertulang yang bersentuhan dengan udara kering, udara lembab, tanah, larutan bahan kimia, air laut, dan percikan air laut serta digunakan pada struktur penahan air. Tabel 1 (Jack C. Mc Cormac, 2004) memperlihatkan lebar retak maksimum yang dapat diizinkan berdasarkan lebar retak yang ditentukan oleh Komite ACI 224 dalam berbagai situasi dan kondisi yang ada diantaranya udara kering, udara lembab, air laut maupun percikan air laut dan lain-lain.

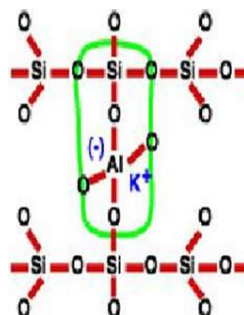
Tabel 1. Lebar retak maksimum yang diizinkan

Batang yang bersentuhan dengan	Lebar retak yang diizinkan
Udara kering	0.016 inch (0.4064 mm)
Udara lembab, tanah	0.012 inch (0.3048 mm)
Larutan bahan kimia	0.007 inch (0.1778 mm)

Air laut dan percikan air laut	0.006 inch (0.1524 mm)
Struktur penahan air	0.004 inch (0.1016 mm)

D. Mortar Geopolimer

Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978. Geopolimer merupakan senyawa anorganik alumino silikat yang disintesis dari bahan-bahan yang banyak mengandung Silikon dan Aluminium melalui proses polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi ini, Aluminium (Al) dan Silika (Si) mempunyai peranan penting dalam ikatan polimerisasi (Davidovits, 1994). Proses polimerisasi adalah suatu reaksi kimia antara aluminosilika oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali *polysialate*. Proses polimerisasi menghasilkan suatu rantai dalam bentuk tiga struktur dimensional dimana masing-masing terdiri dari bentuk ikatan-ikatan *polymeric Si-O-Al-O (Polysialate)*. Ikatan-ikatan tersebut dibagi dalam tiga jenis yaitu *Polysialate (Si-O-Al-O)*, *Polysialate-Siloxo (Si-O-Al-O-Si-O)* dan *Polysialate-Disiloxo (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)* (lihat Gambar 9) (Sugiri dkk., 2009). Salah satu parameter proses polimerisasi adalah reaktan yang digunakan, yaitu SiO_2 , H_2O , dan NaOH . (Fansuri dkk., 2008)



Gambar 9. Ikatan polimerisasi pada geopolimer

Secara umum, ada tiga peggolongan dalam sintesis geopolimer yaitu aluminosilikat sebagai bahan mentah (*raw material*), kaolin atau metakaolin sebagai filler, geopolimer liquor berupa alkali hidroksida untuk melarutkan alumina dan silika, serta natrium atau kalium silikat sebagai *binder/alkali activator/plasticizer*. Penambahan *filler* berupa kaolin atau metakaolin dilakukan bila laju pelarutan Al pada *raw material* tidak cukup untuk menghasilkan gel dengan komposisi yang diinginkan. (Komnitsas & Zaharaki, 2007)

Dalam konteks pengembangan proses berwawasan lingkungan, keunggulan geopolimer tidak hanya bertumpu pada konsumsi energi yang lebih rendah daripada OPC, tetapi juga pada fleksibilitas bahan baku yang sangat tinggi. Proses sintesis geopolimer praktis dapat memanfaatkan padatan aluminosilikat apapun, dari mineral alami, bahan sintetik, hingga limbah anorganik. Xu & Van Deventer (2000) menggolongkan bahan-bahan baku aluminosilikat ini sebagai: (1) bahan-bahan terkalsinasi, misalnya metakaolin, abu layang, ampas peleburan logam (*slag*), dan sebagainya, serta (2) bahan-bahan tak terkalsinasi seperti mineral-mineral kaolinit, feldspar, limbah pengolahan bijih tambang (*tailing*), dan lain-lain.

Geopolimer dapat dikatakan ramah lingkungan karena menggunakan bahan-bahan yang berasal dari limbah industri dan proses pembuatannya tidak memerlukan energi yang banyak, tidak seperti semen yang pembuatannya memerlukan proses pembakaran hingga suhu 800°C.

Geopolimer yang berfungsi sebagai binder dapat dibagi menjadi empat yaitu: (Davidovits, 2013)

1. Semen geopolimer berbahan dasar *slag*
2. Semen geopolimer berbahan dasar *rock*
3. Semen geopolimer berbahan dasar *fly ash*
4. Semen geopolimer berbahan dasar *ferro-sialate*

Bahan dasar untuk pembuatan material geopolimer adalah bahan-bahan yang mengandung banyak unsur-unsur *silicon* (Si) dan aluminium (Al) (Hardjito, 2004). Salah satu bahan yang mengandung banyak unsur tersebut adalah *fly ash* yang merupakan abu sisa hasil pembakaran batu bara. *Fly ash* memiliki ukuran butiran yang hampir sama dengan semen sehingga *fly ash* dipilih sebagai bahan pengganti semen.

Dalam penggunaannya sebagai material perbaikan, mortar geopolimer mempunyai beberapa kelebihan diantaranya tahan terhadap serangan asam sulfat, mempunyai rangkai dan susut yang kecil, tahan terhadap reaksi alkali-silika, tahan terhadap api, dan dapat mengurangi polusi udara. Namun selain mempunyai banyak kelebihan, mortar geopolimer juga mempunyai kekurangan yaitu pembuatannya sedikit lebih rumit dibandingkan beton konvensional karena jumlah material yang digunakan lebih banyak daripada beton konvensional, serta belum ada perhitungan *mix design* yang pasti. (Andoyo, 2006)

E. Material Penyusun Mortar Geopolimer

Material penyusun mortar geopolimer yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash*, aktivator berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3), *superplasticizer*, dan boraks.

E.1. Fly Ash

Menurut SNI 03-6414-2002, *Fly ash* adalah limbah hasil pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap berbentuk halus, bundar, dan bersifat pozzolanik. Komposisi utama dari *fly ash* terdiri dari senyawa *silicate glass* yang mengandung silika (Si), Alumina (Al), Ferrum (Fe) dan Kalsium (Ca), juga terdapat magnesium (Mg), potassium (P), sodium (Na), sulfur (S), dan karbon (C) dalam jumlah yang sedikit.

Fly ash tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus oksida silika yang dikandung oleh *fly ash* akan bereaksi secara kimia dengan sodium hidroksida dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat. (Hardjito, 2004). Selain itu secara mekanik, butiran *fly ash* yang lebih halus daripada butiran semen ini akan mengisi ruang kosong (rongga) di antara butiran-butiran agregat halus.

Fly ash memiliki sifat pozzolan dengan kandungan silikat dan aluminat yang tinggi sehingga dapat bereaksi dengan air dan kapur padam serta dapat berubah menjadi massa padat yang tidak larut dalam air. (Tjokrodimulyo, 1996). *Fly ash* juga merupakan material ramah lingkungan karena merupakan hasil limbah industri dan tidak menghasilkan gas CO_2

yang dapat merusak atmosfer seperti halnya semen. Oleh karena itu, *fly ash* dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti pemakaian semen, baik untuk adukan mortar maupun untuk campuran beton. Adapun kekurangan dari *fly ash* yaitu bersifat getas sehingga perlu penambahan serat untuk meningkatkan daktilitas dan kapasitas struktur dalam memikul beban.

Klasifikasi *fly ash* menurut ASTM 618-19 yaitu:

a. Kelas C

Fly ash yang mengandung $\text{CaO} > 18\%$, dihasilkan dari pembakaran batubara *lignite* atau sub bitumen. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 50 \%$.

b. Kelas F

Fly ash yang mengandung $\text{CaO} < 18\%$, dihasilkan dari pembakaran batubara *anthracite* atau bitumen. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 50 \%$.

c. Kelas N

Pozzolan alam / pozzolan yang telah dikalsinasi atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah *diatomic*, *opaline chertz* dan *shales*, *tuff* dan abu vulkanik, dapat diproses melalui pembakaran atau tidak. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70 \%$..

Unsur utama dalam proses geopolimerisasi adalah Si dan Al. Oleh karena itu *fly ash* yang bisa digunakan sebagai campuran mortar geopolimer adalah *fly ash* yang memiliki kandungan CaO rendah serta

kandungan Si dan Al lebih dari 50 %. Dari ketiga tipe *fly ash* di atas, yang memenuhi persyaratan tersebut adalah *fly ash* tipe C dan tipe F. *Fly ash* yang digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash* tipe C yang berasal dari PLTU Bosowa Jeneponto, Sulawesi Selatan.

E.2. Aktivator

Aktivator digunakan untuk mengaktifkan *fly ash* agar mempunyai sifat mengikat. Aktivator yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3).

1. Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium Hidroksida atau biasa dikenal dengan soda api berfungsi sebagai aktivator dalam reaksi polimerisasi, bersifat basa kuat sebagai reaktan alkalin. Natrium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Natrium hidroksida yang dijual di pasaran berbentuk serbuk dengan kandungan natrium hidroksida 98%, maka dari itu perlu dijadikan larutan. Natrium hidroksida sangat larut dalam air dan akan melepaskan panas ketika dilarutkan karena pada proses pelarutannya dalam air bereaksi secara eksotermis. Larutan natrium hidroksida dalam penelitian ini akan menggunakan molaritas 8M berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Ekaputri & Triwulan, 2013). Pada variasi konsentrasi larutan natrium hidroksida yaitu 6M-14M, didapatkan konsentrasi natrium hidroksida 8M untuk pembentukan geopolimer *fly ash* yang optimum. Diperkirakan terdapat cukup ion Na^+

dan OH⁻ untuk reaksi geopolimerisasi yang sempurna pada konsentrasi NaOH 8M dan dengan demikian menghasilkan sampel geopolimer yang lebih padat. (Ng dkk, 2018). Larutan ini harus dibuat dan didiamkan setidaknya selama 24 jam sebelum pemakaian (Hardjito dkk., 2004).

2. Natrium Silikat (Na₂SiO₃)

Natrium silikat merupakan salah satu bahan tertua dan paling aman yang sering digunakan dalam industri kimia. Natrium Silikat atau *water glass* berperan sebagai katalisator untuk mempercepat reaksi polimerisasi yang terjadi pada *fly ash*. Campuran *fly ash* dengan natrium silikat jika diamati dalam ukuran mikroskopis, terlihat bahwa campuran *fly ash* dan natrium silikat membentuk ikatan yang sangat kuat namun terjadi banyak retakan (Andoyo, 2006). Natrium silikat tersedia dalam 2 bentuk, yaitu padatan dan larutan dimana untuk campuran beton lebih banyak digunakan dengan bentuk larutan. Natrium silikat pada mulanya digunakan sebagai campuran dalam pembuatan sabun. Tetapi dalam perkembangannya, Natrium silikat dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, *coating*, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri, seperti kertas, tekstil dan serat. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa Natrium silikat dapat digunakan untuk bahan campuran dalam beton (Hartono & Sutanto, 2005 (dalam Andoyo, 2006)).

E.4. Superplasticizer

Superplasticizer (high range water admixtures) adalah bahan tambah (admixture) yang dapat meningkatkan kelecakan (*workability*) dari campuran. *Superplasticizer* terutama digunakan pada beton mutu tinggi karena dapat mengurangi air sampai 30%. *Superplasticizer* dapat menghasilkan beton yang mengalir tanpa terjadi pemisahan (segregasi/bleeding) yang umumnya terjadi pada beton dengan jumlah air yang besar sehingga berguna untuk percetakan beton di tempat-tempat yang sulit seperti tempat pada penulangan yang rapat. Jenis-jenis *superplasticizer* yang biasa digunakan adalah *superplasticizer naphthalene*, *superplasticizer polycarboxylate*, dan *superplasticizer sodium glukonat*. *Superplasticizer naphthalene* cocok untuk cuaca panas, memiliki nilai slump yang baik, bisa digunakan untuk *ready mix* atau pekerjaan dengan jangka waktu panjang. *Superplasticizer sodium glukonat* memiliki kemampuan untuk mengurangi kadar air pada beton biasa, memperlambat *setting time* beton dan meningkatkan *workability*. *Superplasticizer polycarboxylate* (PCE) adalah *superplasticizer* yang paling efektif. PCE mampu mengurangi kadar air sampai 40% dan bisa digunakan untuk beton dengan mutu tinggi, perbandingan air dan semen yang didapat adalah 0,2. PCE memiliki nilai slump yang baik dan tidak menyebabkan keterlambatan pada beton biasa untuk mendapatkan kekuatan yang ingin dicapai. *Superplasticizer* yang digunakan dalam penelitian adalah *Superplasticizer polycarboxylate (Plastiment Vz)*.

E.5. Boraks

Boraks merupakan senyawa yang bisa digunakan sebagai salah satu aktivator atau senyawa tambahan dalam pembuatan mortar geopolimer. Boraks yang digunakan memiliki senyawa kimia *Sodium Tetraborate Pentahydrate* ($(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O})$). Boraks merupakan senyawa yang berbentuk kristal lunak yang apabila dilarutkan dalam air akan terurai menjadi natrium hidroksida dan asam borat. Perbandingan dari campuran boraks terhadap alkali aktivator lainnya memberi pengaruh terhadap kekuatan mortar geopolimer yang dihasilkan. Boraks juga bisa digunakan untuk memperlambat *setting time* pada sebuah mortar geopolimer. (Mackenzie dkk, 2005)

F. Serat PVA

PVA (*Polyvinyl Alcohol*) merupakan salah satu polimer yang larut dalam air dan memiliki kemampuan membentuk serat yang baik, biokompatibel, memiliki ketahanan kimia, dan *biodegradable*. Pada penelitian (Shalumon, 2010), PVA dapat berinteraksi dengan natrium alginat melalui metode *electrospinning* membentuk komposit. Selain itu juga diketahui bahwa PVA dapat membentuk gel dengan berbagai pelarut. Pemanfaatan polimer hidrofilik seperti *Polyvinyl Alcohol* (PVA) dan *Polyvinyl Pyrrolidone* (PVP) sebagai bahan biomaterial menarik perhatian dikarenakan bersifat nonkarsinogenik dan memiliki biokompatibilitas yang tinggi. Tabel 2 menunjukkan karakter fisik dari PVA (Ogur, 2005).

Tabel 2. Karakter Fisik PVA (Ogur, 2005)

Karakter	Nilai
Densitas	1.19-1.31 g/cm ³
Titik leleh	180-240°C
Titik didih	228°C
Suhu penguraian	180°C



Gambar 10. Serat PVA

Adapun Serat *Polyvinyl Alcohol* (PVA) atau PVA fiber adalah jenis serat sintetis, yang terbuat dari bahan yang berkualitas tinggi. Serat PVA memiliki tingkat polimerisasi yang tinggi dan diproses khusus dengan teknologi canggih. Serat PVA juga memiliki kuat tarik yang tinggi, modulus tinggi, elongasi rendah, ketahanan terhadap aus, asam, dan alkali, tahan cuaca yang baik, tidak beracun, tidak menimbulkan polusi dan tidak merusak kulit manusia, serta tidak berbahaya bagi tubuh manusia. Tujuan utama penambahan serat PVA pada mortar geopolimer adalah untuk

mengurangi panjang dan lebar retak yang terjadi sehingga dapat meningkatkan daktilitas struktur.

G. Serat Abaka

Serat Abaka merupakan serat alam yang didapatkan dari bagian batang tanaman (bast fiber). Dengan cara dekortikasi dapat diperoleh bundel serat abaka. Bundel serat Abaka adalah unit terkecil serat yang didapatkan dari pemisahan secara mekanis. Bundel serat ini terdiri dari serat tunggal (single fiber) yang tersusun dari serat-serat mikro (mikrofibril). Didalam mikrofibril tersusun rantai selulosa yang menjadi penopang utama bahan serat alam. Selulosa adalah komponen utama yang memberikan efek kekuatan pada serat alam. Kekuatan yang demikian besar ini didapatkan dari struktur ikatan-ikatan kovalen yang membangunnya. Selain itu, kekuatan serat alam juga sangat dipengaruhi oleh keberadaan cacat pada serat (Dawam dkk., 2009).

Serat abaka digunakan pada penelitian ini berdasarkan penelitian Anggoro (2012) yang menyebutkan bahwa keunggulan dari serat abaka yaitu memiliki kekuatan tarik yang besar, sangat mudah dan murah untuk diproduksi, tahan terhadap air asin dan tahan terhadap korosi. Serat abaka merupakan serat daun yang paling kuat, diikuti oleh sisal, phormium, dan henequen. Beberapa serat alam yang telah diteliti dan digunakan sebagai bahan komposit adalah serat abaka yang memiliki kuat tarik yang bisa mencapai sebesar 717 MPa (Cai dkk, 2016). Selain itu dalam penelitian

yang dilakukan oleh Rachman dkk (2020) yang membandingkan penggunaan serat abaka dengan serat sabut kelapa dengan variasi 0.4%, 0,5% dan 0,6%. Dari hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur pada kandungan serat 0.6% menunjukkan untuk serat abaka memiliki nilai kuat tekan dan kuat lentur berturut-turut sebesar 26.29 MPa dan 3.75 MPa, sedangkan untuk serat sabut kelapa sebesar 25.07 MPa dan 2.59 MPa. Serat abaka mampu lebih meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur disbanding serat sabut kelapa. Dalam studi pemanfaatan serat abaka dalam pembuatan mortar geopolymer menunjukkan ada peningkatan kinerja yang dilihat dari menurunnya nilai retakan hingga angka optimum (Anggoro, 2012). Dengan demikian, pengaruh serat jelas akan memberikan kontribusi pada peningkatan lekatan antara tulangan dengan matriks geopolimer.

Panjang serat abaka yang digunakan pada penelitian ini adalah 20 mm. Panjang 20 mm diambil berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Utomo (2011) dengan memvariasikan panjang serat yang digunakan pada mortar geopolimer. Variasi panjang serat 10 mm, 20 mm, dan 30 mm digunakan pada campuran sampel kubus mortar geopolimer berukuran 50 x 50 x 50 mm³. Dari hasil pengujian kuat tekan didapatkan nilai kuat tekan optimum umur 28 hari pada panjang 20 mm yaitu sebesar 19,62 MPa. Selain itu dengan variasi yang sama, Purnama (2011) melakukan penelitian untuk kuat tarik belah mortar geopolimer dengan benda uji silinder

berukuran 50x100 mm³. Didapatkan nilai kuat tarik optimum pada panjang serat 20 mm sebesar 4,84 MPa.



Gambar 11. Serat abaka