

TUGAS AKHIR

**PENGARUH VARIASI JARAK BAUT TERHADAP PERILAKU
GESER BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT
DENGAN PANEL MORTAR GEOPOLIMER**

***THE EFFECT OF BOLT SPACING VARIATIONS ON SHEAR
BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAM
STRENGTHENED GEOPOLYMER MORTAR PANEL***

**RADIX DWI WARDHANA
D011181016**



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

LEMBAR PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)

**PENGARUH VARIASI JARAK BAUT TERHADAP PERILAKU GESER BALOK
BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN PANEL MORTAR
GEOPOLIMER**

Disusun dan diajukan oleh:

RADIX DWI WARDHANA

D011 18 1016

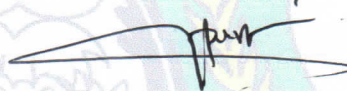
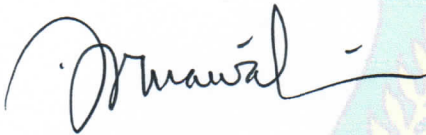
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

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 Radix Dwi Wardhana, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Jarak Baut Terhadap Perilaku Geser Balok Beton Bertulang Yang Diperkuat Dengan Panel Mortar Geopolimer”**, 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,



RADIX DWI WARDHANA

NIM: D011 18 1016

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 VARIASI JARAK BAUT TERHADAP PERILAKU GESER BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN PANEL MORTAR GEOPOLIMER**” 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.**, 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 **H. Bahtiar Syam** dan ibunda **Hj. Lanni Yuliani** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu.
2. **Rolly Riksanto** dan **Harry Nugraha** sebagai saudara dan teman seumur hidup yang selalu memberikan banyak warna dalam hidup penulis.
3. **Hari, Fiqih, Yusril dan Mutmainnah** selaku partner dalam penelitian ini, yang selalu membantu dan menjadi teman berdiskusi dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. **Charlie Efrein, Nurfikri Ramdhani, Muh. Fiqih Hidayat dan Keluarga Warna-Warni** sebagai teman pertama penulis di dunia perkuliahan. Terima kasih untuk semua pengalaman baru paling menyenangkan yang diberikan selama penulis berkuliah di Teknik sipil.
5. **M. Nugroho Joko, Andi Titah Makita Sakti, Nurul Annisa Amiruddin, Utami Octofiany dan Putri Diyah Lestari** sebagai sahabat penulis. Terima kasih atas semua dukungan dan doa yang diberikan pada penulis.
6. **Dini Purnama Dewi** yang selalu membantu dan memberikan semangat serta menjadi teman cerita bagi penulis.
7. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur**. Terima kasih karena telah menjadi teman berdiskusi yang baik dan telah menghidupkan suasana mukim perkuatan serta membuat penulisan tugas akhir ini menjadi sangat menyenangkan.

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, 11 Januari 2023

Penulis

ABSTRAK

Balok beton bertulang menjadi salah satu komponen utama struktur bangunan yang rentan mengalami kerusakan seperti retak, lubang, dan *spalling* yang menjadikan tidak terpenuhinya lagi kekuatan, kekakuan dan stabilitas yang dapat menyebabkan kegagalan pada struktur bangunan. Hal tersebut dapat diatasi dengan memberikan perkuatan (*strengthening*) pada elemen struktur untuk meningkatkan kapasitasnya dalam menahan beban. Umumnya perkuatan yang digunakan seperti *Reinforced Polimer (FRP)*, Plat baja eksternal dan *Concrete Jacketing*. Namun, metode tersebut masih memiliki beberapa kekurangan. Maka dari itu, diusulkan sebuah sistem perkuatan dengan menggunakan panel mortar geopolimer. Material geopolimer berupa *fly ash* digunakan sebagai bahan pengikat pengganti semen untuk mengurangi penggunaan semen yang dapat meningkatkan emisi gas rumah kaca di atmosfer.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku geser serta pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat panel mortar geopolimer dengan pemberian jarak antar baut yang berbeda. 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* 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 dan balok dengan panel perkuatan mortar geopolimer yang dipasang menggunakan baut, dengan jarak antar baut 200 mm dan 300 mm, masing masing sebanyak 1 buah.

Hasil penelitian menunjukkan penggunaan panel mortar geopolimer dapat meningkatkan beban maksimum dan kekakuan pada balok serta mengubah perilaku balok menjadi lebih daktail dengan pemberian jarak antar baut 200 mm. Dari mode kegagalan, balok yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer dengan jarak antar baut 200 mm mengalami kegagalan lentur.

Kata kunci: balok beton, perkuatan, panel mortar geopolimer, jarak antar baut.

DAFTAR ISI

Isi

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan Penelitian	5
D. Manfaat Penelitian.....	5
E. Batasan Masalah	6
F. Sistematika Penulisan	7
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Penelitian Terdahulu	9
B. Beton Bertulang	13
C. Mode Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang.....	17
D. Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang.....	19
E. Retak Pada Balok Beton Bertulang	25
F. Mortar Geopolimer	29
G. Material Penyusun Mortar Geopolimer	32
G.1. <i>Fly ash</i>	32
G.2. Aktivator.....	35
G.3. <i>Superplasticizer</i>	36
G.4. Boraks.....	37
G.5. Serat PVA	38
H. Metode Sambungan	39

BAB 3. METODE PENELITIAN.....	42
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	42
B. Bagan Alir Penelitian	42
C. Alat dan Bahan Penelitian	43
C.1. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer	43
C.2. Pengujian karakteristik mekanis mortar geopolimer	44
C.3. Pengujian karakteristik mekanis tulangan	45
C.4. Pengujian karakteristik mekanis beton	46
C.5. Pengujian geser balok.....	46
D. Benda Uji	50
D.1. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer	50
D.2. Balok Beton Bertulang.....	57
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	63
A. Kuat Tekan Mortar Geopolimer	63
B. Kuat Tarik Belah Mortar Geopolimer	65
C. Karakteristik Mekanis Beton	66
D. Karakteristik Mekanis Tulangan.....	68
E. Pengujian Geser Balok.....	69
E.1 Hubungan Beban Lendutan.....	69
E.2 Beban Maksimum	72
E.3. Hubungan Beban-Regangan.....	74
F. Pola Retak dan Model Kegagalan	77
F.1 Pola Retak dan Model Kegagalan Balok CB.....	77
F.2 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok GM-W-200	79
F.3 Pola Retak dan Mode Kegagalan GM-W-300.....	81
G. Perbandingan Hasil Teoritis dan Eksperimental	84
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	88
A. Kesimpulan	88
B. Saran	88
DAFTAR PUSTAKA.....	90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Balok beton bertulang dengan HCP	9
Gambar 2. Pola retak pada kegagalan balok penampang persegi	11
Gambar 3. Balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja	11
Gambar 4. <i>Setup</i> pengujian lentur balok	12
Gambar 5. Pola retak pada kegagalan dari pengujian balok	13
Gambar 6. Retak Lentur (Nawy, 1998)	18
Gambar 7. Tarik Diagonal (Nawy, 1998)	18
Gambar 8. Keruntuhan Tekan Geser (Nawy, 1998)	19
Gambar 9. Perlawanan terhadap geseran	21
Gambar 10. Perlawanan terhadap geseran setelah penambahan panel perkuatan	23
Gambar 11. Jenis retakan pada beton	27
Gambar 12. Ikatan polimerisasi pada geopolimer	30
Gambar 13. <i>Fly ash</i> tipe C	34
Gambar 14. Serat PVA	39
Gambar 15. Baut dan Mur	41
Gambar 16. Diagram alir pengujian kuat tekan mortar geopolimer	42
Gambar 17. Diagram alir pengujian geser balok	43
Gambar 18. Dimensi Benda Uji	45
Gambar 19. Universal Testing Machine (UTM)	45
Gambar 20. Dimensi benda uji	46
Gambar 21. LVDT	47
Gambar 22. <i>Strain gauge</i> baja dan CN <i>Adhesive</i>	47
Gambar 23. Alat ukur regangan beton (<i>Strain gauge</i> beton) dan CN-E <i>Adhesive</i>	48
Gambar 24. Alat <i>Load cell</i> dan <i>Data logger</i>	49
Gambar 25. Komposisi mortar geopolimer	50
Gambar 26. Partikel <i>fly ash</i> hasil pengujian SEM	52
Gambar 27. NYCON-PVA RECS 15	53

Gambar 28. Proses pembuatan bekisting panel mortar geopolimer	54
Gambar 29. Pengadukan campuran pada <i>mixer</i>	55
Gambar 30. Pembuatan panel mortar geopolimer	56
Gambar 31. Benda uji kubus	57
Gambar 32. Dimensi benda uji balok	58
Gambar 33. Pabrikasi benda uji balok beton bertulang	59
Gambar 34. Sketsa gambar jarak antar baut pada panel	60
Gambar 35. Pemasangan panel mortar geopolimer pada balok beton bertulang	60
Gambar 36. Pemasangan baut dengan <i>wrench</i> (kunci)	60
Gambar 37. Setup benda uji	61
Gambar 38. Posisi <i>strain gauge</i>	62
Gambar 39. Penimbangan benda uji mortar geopolimer	63
Gambar 40. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer	63
Gambar 41. Kuat Tekan Mortar Geopolimer	64
Gambar 42. Penimbangan benda uji mortar geopolimer	65
Gambar 43. Pengujian kuat tarik belah mortar geopolimer	65
Gambar 44. Pengujian kuat tekan beton	67
Gambar 45. Hubungan Beban-Lendutan Sampel	70
Gambar 46. Beban Maksimum	73
Gambar 47. Hubungan beban-regangan tulangan tarik	74
Gambar 48. Hubungan Beban-Regangan Tulangan Geser	75
Gambar 49. Hubungan Beban-Regangan Beton	76
Gambar 50. Pola retak pada balok kontrol (CB).....	78
Gambar 51. Retak Awal Balok Kontrol (CB).....	78
Gambar 52. Retak awal daerah geser	79
Gambar 53. Retak Awal pada balok GM-W-200	79
Gambar 54. Pola Retak dan Model Kegagalan Balok GM-W-200	80
Gambar 55. Retak awal pada balok beton bertulang	80
Gambar 56. Retak awal pada panel mortar geopolimer	81
Gambar 57. Kehancuran pada balok GM-W-200	81

Gambar 58. Pola Retak dan Model Kegagalan Balok GM-W-300	82
Gambar 59. Retak awal pada balok GM-W-300.....	82
Gambar 60. Retak awal pada panel GM-W-300	83
Gambar 61. Retak diagonal utama pada balok GM-W-300.....	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Lebar retak maksimum yang diizinkan	29
Tabel 2. Karakter Fisik PVA	38
Tabel 3. Komposisi kimia <i>fly ash</i> (persen terhadap berat)	51
Tabel 4. Klasifikasi <i>fly ash</i> berdasarkan ASTM C 618 [1]	51
Tabel 5. Properti dari PVA fiber	53
Tabel 6. Komposisi campuran mortar geopolimer	54
Tabel 7. Variasi benda uji balok	57
Tabel 8. Mix desain beton normal per m ³	58
Tabel 9. Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan penambahan serat PVA 0.6% pada umur 3, 7	64
Tabel 10. Hasil pengujian kuat tarik belah mortar geopolimer dengan penambahan serat PVA 0.6% pada umur 28 hari	66
Tabel 11. Hasil pengujian kuat tekan beton umur 28 hari	67
Tabel 12. Hasil pengujian kuat tarik baja	68
Tabel 13. Rekapitulasi Hubungan Beban-Lendutan	71
Tabel 14. Kontribusi kapasitas geser balok beton bertulang	73
Tabel 15. Rekapitulasi perbandingan kapasitas geser eksperimen dan analitis	86

BAB 1. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Perbaikan atau perkuatan elemen-elemen struktur diperlukan apabila terjadi degradasi bahan yang menjadikan tidak terpenuhinya lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat teknik yaitu: kekuatan (*strength*), kekakuan (*stiffness*), stabilitas (*stability*) dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan (*durability*) (Triwiyono,2000). Terdapat dua jenis perbaikan yang dapat dilakukan dalam pekerjaan *retrofitting* yaitu perbaikan (*repairing*) dan perkuatan (*strengthening*). Istilah perbaikan (*repairing*) diterapkan pada bangunan yang telah rusak, dimana telah terjadi penurunan kekuatan, untuk dikembalikan seperti semula. Sedangkan perkuatan (*strengthening*) adalah suatu tindakan modifikasi struktur, mungkin belum terjadi kerusakan, dengan tujuan untuk menaikkan kekuatan atau kemampuan bangunan untuk memikul beban-beban yang lebih besar akibat perubahan fungsi dan stabilitas bangunan. Sehingga, diperlukan suatu mekanisme perkuatan yang efektif dalam menyelesaikan masalah-masalah tersebut.

Mekanisme perkuatan merupakan salah satu upaya penanggulangan yang relevan untuk meningkatkan kinerja struktur beton bertulang eksisting agar memenuhi persyaratan standar. Beberapa metode yang biasanya digunakan, seperti metode *bonded external steel-plate*, yang memberikan peningkatan struktural yang signifikan, namun memiliki kelemahan terhadap ketahanan dari korosi dan api. Pendekatan populer yang berbeda

adalah FRP, yang dicirikan dengan kekuatan tinggi terhadap rasio berat, pengaplikasian yang mudah, ketahanan terhadap korosi dan meminimalkan perubahan geometri. Meskipun demikian, FRP memiliki ketahanan yang kurang baik terhadap paparan suhu yang tinggi (Firmo et al.,2015), tidak efisien diaplikasikan pada lingkungan yang lembab, ketidakcocokan substrat beton, dan memungkinkan kegagalan yang tiba-tiba tanpa adanya peringatan. Hal tersebut dikarenakan resin organik yang digunakan untuk mengikat seratnya (epoksi). Maka dari itu, perlu diusulkan sebuah sistem perkuatan baru untuk memperbaiki kekurangan tersebut, salah satunya dengan penggunaan panel mortar geopolimer yang memiliki keunggulan: tahan terhadap korosi, mempunyai rangkai dan susut yang kecil, tahan terhadap suhu tinggi, dan ramah lingkungan.

Beton tanpa semen atau geopolimer diusulkan oleh Davidovits (Davidovits,2019), dan digambarkan sebagai bahan non-semen yang dibuat dari aluminosilikat pengaktif alkali termasuk limbah industri (abu terbang, slag hasil pembakaran terak) atau metakaolin pada suhu kalsinasi rendah (Duxson et al., 2007). Kehilangan energi dan CO₂ yang dipancarkan saat produksi menurun secara signifikan daripada semen portland biasa (OPC). Selain itu, *fly ash* memiliki sifat yang serupa dengan semen (Hassan et al.,2019; zhang et al.,2018; Kodur et al.,2018; Hardjito et al.,2004). Menurut Fernández-Jiménez (Fernandez-Jimenez.,2008), Beton Geopolimer (GPC) lebih tahan terhadap suhu tinggi daripada beton OPC. Namun, geopolimer dianggap sebagai pengganti semen yang layak dalam

konstruksi bangunan karena sifat mekaniknya yang unggul, dan tahan terhadap korosi. Meskipun GPC memiliki durabilitas dan sifat mekanik yang lebih baik, sifat tarik dan lenturnya sama atau bahkan lebih rendah dari OPC (Farhan et al.,2019; Nath & Sarker,2017). Oleh karena itu, untuk lebih meningkatkan penerapan GPC, beberapa penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kekuatan lentur dan mengurangi sifat getasnya.

Beberapa penelitian mengevaluasi kinerja GPC yang diperkuat dengan serat. Berbagai jenis serat yang telah digunakan dalam geopolimer seperti karbon, baja, kaca, polivinil alkohol (PVA), polipropilen, kapas, dan serat alami (Qin et al.,2019, 2021; Lin et al.,2010; Krahl et al.,2021; Das et al.,2020; Hossain et al.,2013; Rashad,2018). Salah satu serat yang menjadi perhatian beberapa tahun terakhir yaitu serat PVA karena kekuatan tariknya yang tinggi, modulus Young yang mirip dengan beton, dan harganya yang murah (Li et al.,2001; Hu et al.,2013). Selanjutnya, serat PVA memiliki ketahanan yang baik terhadap keasaman dan alkalinitas, yang juga merupakan karakteristik dari geopolimer (Sun et al.,2019). Karena serat PVA memiliki efek positif pada daya tahan GPC (Xu et al.,2018).

Zhang et al (Zhang et al.,2019) melakukan penelitian menggunakan mortar geopolimer yang diperkuat dengan tekstil (TRGM) untuk memperkuat balok. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 1 lapisan TRGM mampu meningkatkan kapasitas geser sebesar 47% sedangkan 2 lapisan TRGM mampu meningkatkan kapasitas geser sebesar 106%, jika dibandingkan dengan balok yang tidak diperkuat. (Zhang et al.,2016).

Penelitian ini mengembangkan penggunaan mortar geopolimer sebagai material perkuatan geser balok beton bertulang dalam bentuk panel perkuatan yang diaplikasikan dengan cara diangkur menggunakan baut dan mur. Perkuatan tersebut diharapkan dapat meningkatkan kinerja struktural, termasuk daya dukung, kekakuan, dan daktilitas balok bertulang. Salah satu faktor yang mempengaruhi aksi komposit antara balok beton dengan panel mortar geopolimer adalah jarak antara baut. Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian berjudul **“PENGARUH VARIASI JARAK BAUT TERHADAP PERILAKU GESER BALOK BETON BERTULANG YANG DIPERKUAT DENGAN PANEL MORTAR GEOPOLIMER”**.

B. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat panel mortar geopolimer dan serat PVA dengan variasi jarak antar baut 200 mm dan 300 mm?
2. Bagaimana pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat panel mortar geopolimer dan serat PVA dengan jarak antar baut 200 mm dan 300 mm?

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat panel mortar geopolimer dan serat PVA dengan jarak antar baut 200 mm dan 300 mm.
2. Menganalisis pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat panel mortar geopolimer dan serat PVA dengan jarak antar baut 200 mm dan 300 mm.

D. Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini diharapkan memberi sejumlah manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi solusi dalam upaya penanganan limbah *fly ash* yang merupakan limbah *by product* yang terus mengalami peningkatan kuantitas dalam memenuhi kebutuhan industri. Disamping itu, penggunaan semen berdampak pada kerusakan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberi solusi dalam upaya pencegahan kerusakan lingkungan dan khususnya industri betonagar menjadi acuan dalam perencanaan beton ramah lingkungan berbasis *fly ash*.
2. Menjadi solusi perkuatan geser balok dengan menggunakan panel mortar geopolimer yang berbahan dasar *fly ash* dan serat PVA.
3. 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. Percobaan dilakukan terhadap benda uji balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer dengan penambahan 0.6% serat PVA.
2. Mortar geopolimer diproduksi dengan mencampurkan *fly ash*, pasir, NaOH, Na₂SiO₃, *superplasticizer*, dan boraks.
3. *Fly Ash* kelas C sebagai pengganti semen berasal dari PLTU Bosowa, Jeneponto, Sulawesi Selatan, Indonesia, dan serat PVA dengan tipe NYCON-PVA RECS 15 dan panjang 8 mm.
4. Panel mortar geopolimer dengan dimensi 700 mm x 15 mm x 300 mm yang diberikan *wiremesh* M5.
5. Dimensi balok 2300 mm x 150 mm x 300 mm
6. Sambungan baut menggunakan baut drat M12 standar SNI dengan variasi jarak antar baut 200 mm dan 300 mm.
7. Benda uji diberi beban lentur dengan beban dua titik secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 1500 kN.
8. Pembebanan hingga benda uji mengalami keretakan pada beban maksimum.
9. Tidak dilakukan perhitungan analitis pada tegangan geser *pons* (Tegangan geser 2 arah).

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

Dalam bab ini, 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.

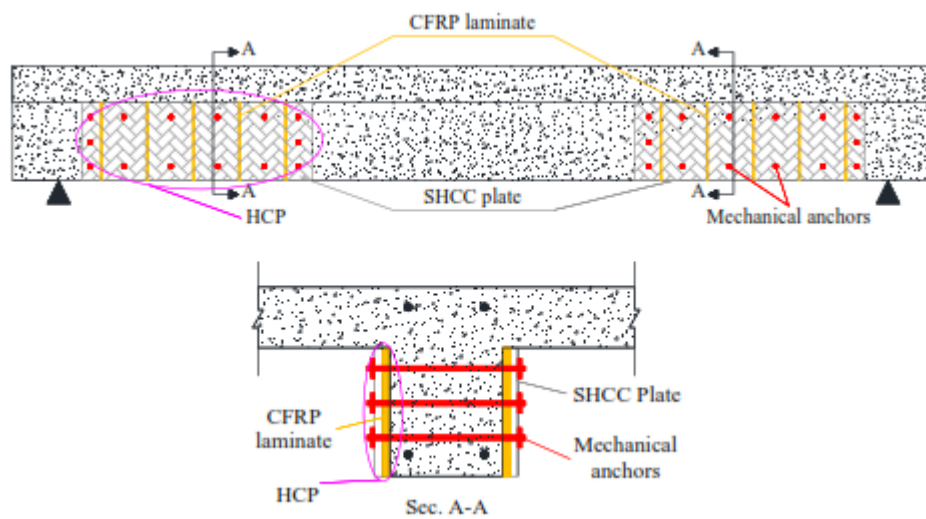
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

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

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

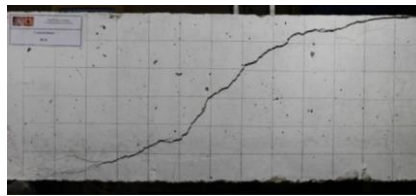
Bahgi et al. (2016), melakukan penelitian tentang perkuatan geser balok beton bertulang dengan teknik *Hybrid Composite Plates* (HCP). Karena kondisi ikatan yang sangat baik antara laminasi *Strain Hardening Cementitious Composite* (SHCC) dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP). Gambar 1 menunjukkan balok beton bertulang yang diberi perkuatan geser menggunakan teknik HCP.



Gambar 1. Balok beton bertulang dengan HCP

Sebanyak 17 balok beton bertulang diuji untuk memeriksa efisiensi HCPs sebagai teknik perkuatan geser. Tujuh balok uji dengan penampang berbentuk persegi panjang dan sepuluh balok uji dengan penampang T. Pengaruh persentasi dan kemiringan laminasi CFRP terhadap efektifitas perkuatan geser HCP juga diselidiki. Dalam penelitian ini, dilakukan 2 metode pengaplikasian HCP pada balok beton, yaitu: (1) menggunakan

perekat epoksi; dan (2) menggunakan angkur mekanik sebagai tambahan pada perekat epoksi. Hal ini menunjukkan bahwa ketika menggunakan perekat epoksi, kontribusi perkuatan geser HCPs dibatasi oleh kekuatan tarik substrat beton dari balok yang diperkuat. Ketika angkur mekanik diterapkan selain perekat epoksi, potensi perkuatan geser HCPs sepenuhnya dimobilisasi. Kapasitas beban maksimum masing-masing balok yang diperkuat dengan HCPs adalah 105% dan 157% lebih tinggi dari balok penampang persegi panjang dan penampang T tanpa perkuatan geser (balok kontrol). Selain itu, hasil yang diperoleh menunjukkan efisiensi HCPs untuk geser memperbaiki balok beton bertulang yang rusak.



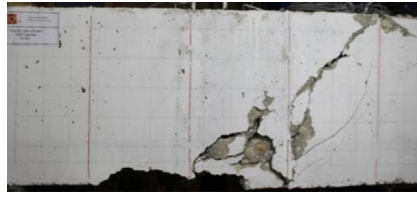
a. Pola retak pada kegagalan balok R-C-R



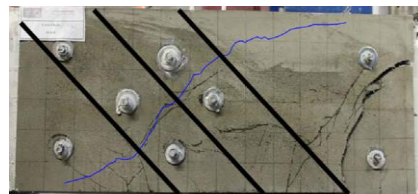
b. Pola retak pada kegagalan balok R-75-R



c. Pola retak pada kegagalan balok R-SP

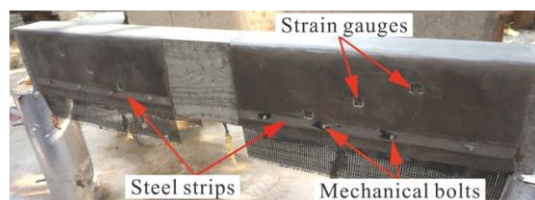


d. Pola retak pada kegagalan balok R-NSM-4L 90



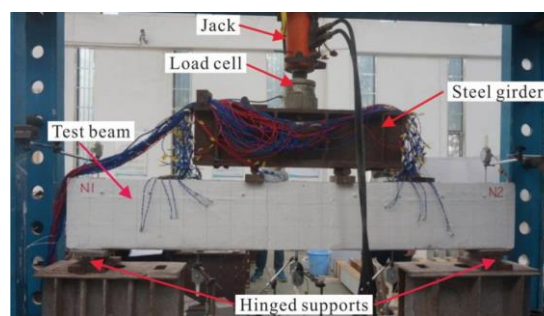
e. Pola retak pada kegagalan pada permukaan lateral balok R-D-3L45-B
Gambar 2. Pola retak pada kegagalan balok penampang persegi

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



Gambar 3. Balok perkuatan TRGM dengan angkur strip baja

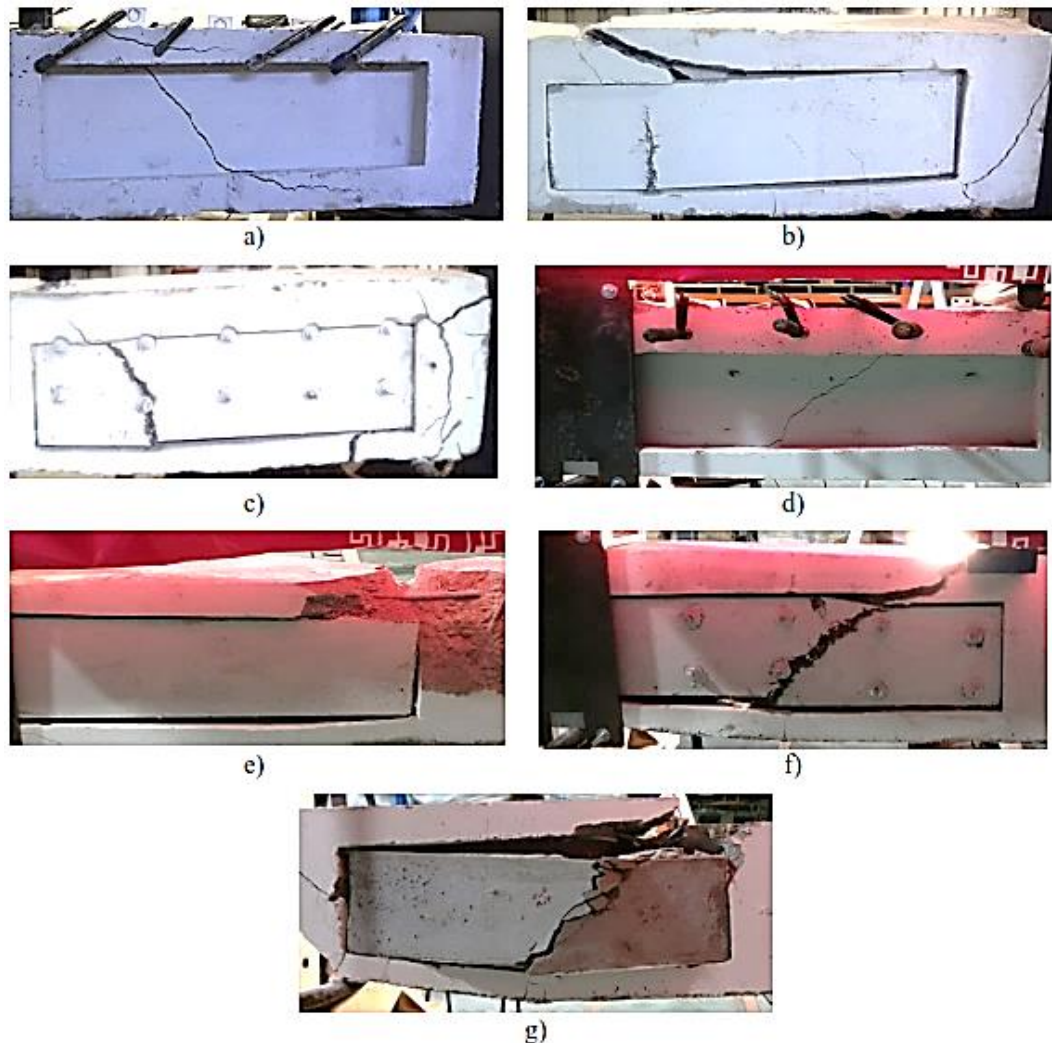
Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas geser pada satu dan 2 lapisan dari perkuatan TRGM dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan masing-masing 47% serta 106%. Selain itu, kapasitas geser bisa semakin tinggi 15-21% ketika angkur strip baja digabungkan. TRGM dipercaya sebagai solusi pada retrofit dan perkuatan beton bertulang, sebab sangat tahan terhadap suhu tinggi, tahan terhadap korosi, dan tahan terhadap cuaca. Gambar 4 menunjukkan *setup* pengujian lentur balok.



Gambar 4. *Setup* pengujian lentur balok

L. Lucio et al. (2018) melakukan penelitian tentang perkuatan geser balok beton bertulang dengan panel tipis dari mortar yang diperkuat dengan *recycled steel fibres* (RSF). Panel diproduksi dengan menggunakan teknik pencampuran yang mirip dengan yang digunakan dalam teknologi beton serat infiltrasi bubuk. Panel RSFRM diterapkan pada permukaan lateral balok dengan menggunakan dua strategi berikut: (1) direkatkan ke substrat beton dengan menggunakan perekat epoksi eksklusif; dan (2) selain perekat epoksi, pengencang mekanis diterapkan. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan daya dukung beban yang jauh lebih tinggi daripada balok kontrol. Penggunaan perekat baut mekanis yang lebih

efektif dibuktikan dengan adanya peningkatan kekakuan yang mengakibatkan retak geser yang awalnya memiliki kecenderungan terbentuk di badan balok beton bertulang, telah berkembang melalui panel. Hal ini ditunjukkan pada gambar 5 dari pola retak yang terjadi.



Gambar 5. Pola retak pada kegagalan dari pengujian balok

B. Beton Bertulang

Beton merupakan pengerasan campuran antara semen, air, agregat halus (pasir), dan agregat kasar (batu pecah atau kerikil). Kadang-kadang

ditambahkan pula campuran bahan lain (*admixture*) untuk memperbaiki kualitas beton. Campuran antara semen dan air akan membentuk pasta semen berfungsi sebagai bahan ikat untuk material pasir dan kerikil yang merupakan bahan agregat yang berfungsi sebagai bahan pengisi. Bahan penyusun tersebut yang masih plastis kemudian dicor ke dalam acuan dan dirawat untuk mempercepat reaksi hidrasi campuran semen air, yang menyebabkan pengerasan beton. Beton yang terbentuk ini mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, tetapi ketahanan terhadap tarik rendah.

Untuk menutupi kelemahan dari beton yang memiliki kuat tarik yang rendah maka beton diberikan baja tulangan yang memiliki sifat yang kuat terhadap beban tarik. Beton bertulang adalah kombinasi dari beton serta tulangan baja, yang bekerja secara bersama-sama untuk memikul beban yang ada. Tulangan baja memberikan kuat tarik tinggi yang menjadi kelemahan dari beton. (Perancangan Struktur Beton Bertulang SNI 2847:2013).

Sifat utama dari beton, yaitu sangat kuat terhadap beban tekan, tetapi juga bersifat getas/mudah patah atau rusak terhadap beban tarik. Dalam perhitungan struktur, kuat tarik beton ini biasanya diabaikan. Sifat utama dari baja tulangan, yaitu sangat kuat terhadap beban tarik maupun beban tekan. Dari sifat utama tersebut, maka jika kedua bahan (beton dan baja tulangan) dipadukan menjadi satu-kesatuan secara komposit, akan diperoleh bahan baru yang disebut beton bertulang. Beton bertulang ini mempunyai sifat sesuai dengan sifat bahan penyusunnya, yaitu sangat kuat

terhadap beban tarik maupun beban tekan, sedangkan beban tekan cukup ditahan oleh beton (Asroni, 2010).

Sukses beton bertulang sebagai bahan konstruksi yang universal cukup mudah dipahami jika dilihat dari banyaknya kelebihan yang dimilikinya. Kelebihan tersebut antara lain (McCormac, 2004):

1. Beton memiliki kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kebanyakan bahan yang lain.
2. Beton bertulang mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air, bahkan merupakan bahan struktur terbaik untuk bangunan yang banyak bersentuhan dengan air.
3. Struktur beton bertulang sangat kokoh.
4. Beton bertulang tidak memerlukan biaya pemeliharaan yang tinggi.
5. Dibandingkan dengan bahan lain beton memiliki usia layan yang sangat panjang. Dalam kondisi-kondisi normal, struktur beton bertulang dapat digunakan sampai kapan pun tanpa kehilangan kemampuannya untuk menahan beban.
6. Beton biasanya merupakan satu-satunya bahan yang ekonomis untuk pondasi tapak, dinding, basement, tiang tumpuan jembatan, dan bangunan-bangunan semacam itu.
7. Salah satu ciri khas beton adalah kemampuannya untuk dicetak menjadi bentuk sangat beragam, mulai dari pelat, balok, dan kolom yang sederhana sampai atap kubah dan cangkang besar.

8. Di sebagian besar daerah, beton terbuat dari bahan-bahan lokal yang murah (pasir, kerikil, dan air) dan relatif hanya membutuhkan sedikit semen dan tulangan baja, yang mungkin saja harus didatangkan dari daerah lain.
9. Keahlian buruh untuk membangun konstruksi beton bertulang lebih rendah bila dibandingkan dengan bahan lain seperti baja struktur.

Di samping kelebihan-kelebihan beton bertulang sebagai suatu bahan struktur, beton bertulang juga mempunyai berbagai kekurangan dan kelemahan. Kelemahan-kelemahan tersebut antara lain adalah (McCormac, 2004):

1. Beton mempunyai kuat tarik yang sangat rendah, sehingga memerlukan penggunaan tulangan tarik.
2. Beton bertulang memerlukan bekisting untuk menahan beton tetap di tempatnya sampai beton tersebut mengeras. Selain itu, penopang atau penyangga sementara mungkin diperlukan untuk menjaga agar bekisting tetap berada pada tempatnya, misalnya pada kolom, dinding, atap, dan struktur-struktur sejenis, sampai bagian-bagian beton ini cukup kuat untuk menahan beratnya sendiri.
3. Rendahnya kekuatan per satuan berat dari beton mengakibatkan beton bertulang menjadi berat.
4. Rendahnya kekuatan persatuan volume akan mengakibatkan beton akan berukuran relatif lebih besar.

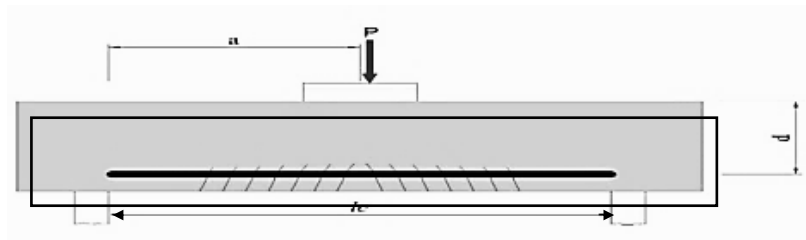
Sifat-sifat beton sangat bervariasi karena bervariasinya proporsi-campuran dan pengadukannya.

C. Mode Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang

Menurut Nawy (2008), kelangsingan balok yaitu perbandingan antara bentang bersih dengan tinggi balok menentukan ragam keruntuhan balok. Jenis keruntuhan ini pada dasarnya ada 3 ragam yaitu keruntuhan lentur, keruntuhan tarik diagonal dan keruntuhan tekan akibat geser.

1. Keruntuhan Lentur

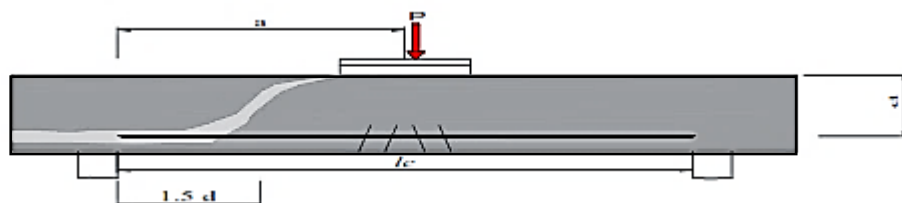
Daerah yang mengalami keruntuhan lentur, terutama terjadi pada sepertiga tengah bentang, dan tegak lurus terhadap arah tegangan utama. Perbandingan antara bentang geser (a) dengan tinggi efektif balok (d) sebesar antara $> 5,5$ untuk beban terpusat dan perbandingan antara jarak antar tumpuan (L) dengan tinggi efektif balok (d) $L/d > 16$ untuk beban terdistribusi. Retak ini diakibatkan oleh tegangan geser ϑ yang sangat kecil dan tegangan lentur f yang sangat dominan yang besarnya hampir mendekati tegangan utama horizontal $f_t \max$. Dalam keadaan runtuh lentur demikian, beberapa retak halus berarah vertikal terjadi di daerah tengah bentang sekitar 50% dari yang diakibatkan oleh beban runtuh lentur. Apabila besarnya beban bertambah terus, retak – retak di tengah bentang bertambah, dan retak awal yang sudah terjadi akan semakin lebar dan semakin panjang menuju sumbu netral penampang. Gambar 6 menunjukkan retak lentur.



Gambar 6. Retak Lentur (Nawy, 1998)

2. Keruntuhan Tarik Diagonal

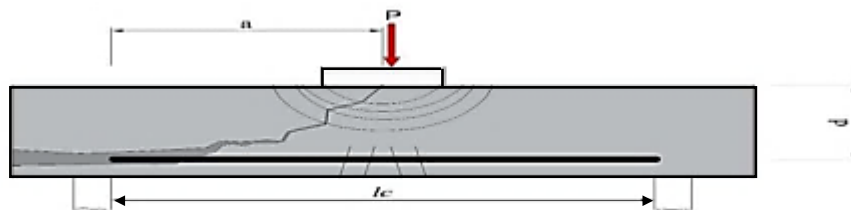
Keruntuhan ini dapat terjadi apabila kekuatan balok dalam diagonal tarik lebih kecil daripada kekuatan lenturnya. Perbandingan antara bentang geser (a) dengan tinggi efektif balok (d) adalah 2,5 sampai 5,5 untuk beban terpusat dan 11-16 untuk beban terdistribusi. Balok demikian disebut balok dengan kelangsingan menengah. Retak mulai terjadi di tengah bentang, berarah vertikal berupa garis halus. Hal ini diikuti dengan rusaknya lekatan antara baja tulangan dengan beton disekitarnya pada perletakan, tanpa adanya peringatan sebelum runtuh, dua atau tiga retak diagonal terjadi pada jarak antara $1,5d$ sampai $2d$ dari muka perletakan. Gambar 7, menunjukkan gambar tarik diagonal.



Gambar 7. Tarik Diagonal (Nawy, 1998)

3. Keruntuhan Tekan Geser

Balok yang mengalami keruntuhan tekan geser mempunyai perbandingan antara bentang geser (a) dengan tinggi efektif balok (d) sebesar antara 1 sampai 2,5 untuk beban terpusat dan $l_c/d < 5,0$ untuk beban terdistribusi. Seperti pada tarik diagonal, keruntuhan ini dimulai dengan timbulnya retak lentur-halus-vertikal di tengah bentang, dan tidak terus menjalar, karena terjadinya kehilangan lekatan antara tulangan membujur (longitudinal) dengan beton di sekitarnya pada daerah perletakan. Gambar 8, menunjukkan keruntuhan tekan geser.



Gambar 8. Keruntuhan Tekan Geser (Nawy, 1998)

Setelah itu diikuti dengan retak miring yang lebih curam daripada retak diagonal tarik (secara tiba-tiba dan menjalar terus menuju sumbu netral). Pada saat bertemunya retak miring ini dengan tepi beton yang tertekan, terjadilah keruntuhan secara tiba-tiba.

D. Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

a) Kapasitas Geser Sebelum Penambahan Panel Perkuatan

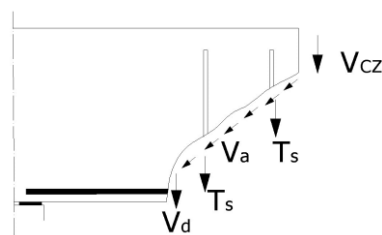
Kejadian geser pada balok beton tanpa tulangan, umumnya kerusakan terjadi di daerah sepanjang kurang lebih tiga kali tinggi efektif

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 pra tegang. Proses terjadinya retak lentur umumnya cenderung melambat dimulai dari tepi masuk ke dalam 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 di dalam 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 9. Perlawanan terhadap geseran

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 yang disyaratkan (Mpa)

b_w = Lebar penampang balok (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,

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

f_y = Kuat leleh tulangan geser (MPa).

A_v = Luas tulangan geser (mm^2)

Tetapi kuat geser V_s tidak boleh diambil lebih dari nilai

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

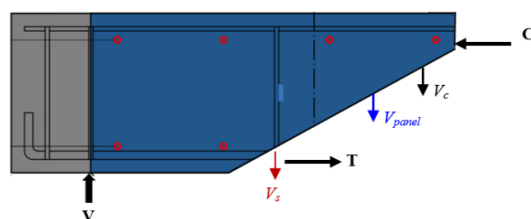
Untuk jarak tulangan geser yang dipasang tegak lurus terhadap sumbu aksial komponen struktur tidak boleh melebihi $d/2$ untuk struktur non-prategang dan $(3/4) h$ untuk komponen struktur prategang, atau 600 mm. Ketentuan tulangan geser minimum dapat diabaikan bila dapat ditunjukkan dengan pengujian bahwa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

$$A_v = \frac{75 \sqrt{f'c} b_w d}{(1200) f_y} \dots\dots\dots (5)$$

Tetapi A_v 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 10. 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 (1) dapat ditulis menjadi

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

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.

Kapasitas geser panel diperoleh dengan menentukan adanya ikatan sempurna antara panel dan substrat beton, menggunakan persamaan

$$v_{panel} = 2 \left(\frac{2}{3} t_{panel} h_{panel} \tau_{avg} \right) b_w^* \cdot d \dots\dots\dots (7)$$

Dimana,

v_{panel} = tegangan panel (N/mm²)

t_{panel} = tebal panel (mm)

h_{panel} = tinggi panel (mm)

τ_{avg} = tegangan geser rata-rata (mm)

Untuk balok yang diperkuat dengan panel dan angkur mekanis, lebar dasar beton dengan retak tarik diagonal (b^*w) didefinisikan dengan persamaan

$$b_w^* = \frac{(b_w + 2t_{panel})}{2} \dots\dots\dots (7)$$

Dimana,

b_w = tebal dari panel (mm)

Dengan demikian, kontribusi panel pada kekuatan geser dihitung dengan menggunakan Persamaan.

$$v_{panel} = \frac{4t_{panel}h_{panel}\tau_{avg}}{3(2b_w^*)d} \dots\dots\dots (7)$$

Sehingga, kapasitas panel:

$$V_{panel} = v_{panel} \times A \dots\dots\dots (8)$$

Dimana,

A = luas panel (mm²)

E. Retak Pada Balok Beton Bertulang

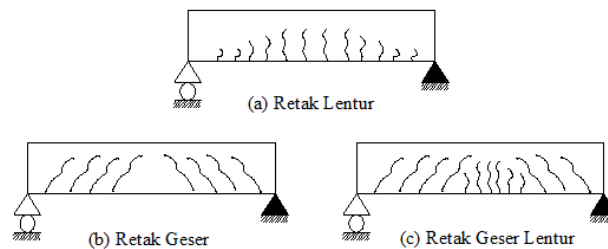
Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja

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, 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 (lihat Gambar 11).



Gambar 11. 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.As.

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.

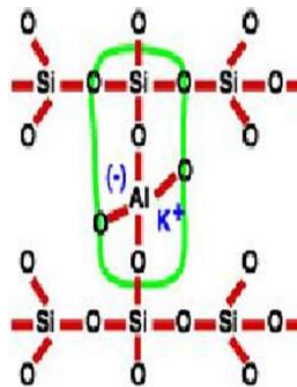
Komite ACI 224, dalam laporannya tentang retak memperlihatkan sejumlah perkiraan lebar retak maksimum yang dapat diizinkan untuk batang beton bertulang dalam berbagai situasi dan kondisi yang terjadi seperti pada beton bertulang yang bersentuhan dengan udara kering, udara lembab, tanah, larutan bahan 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	0.04 ch (0.1016 mm)

F. 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 10) (Sugiri dkk., 2009). Salah satu parameter proses polimerisasi adalah reaktan yang digunakan, yaitu SiO_2 , H_2O , dan NaOH . (Fansuri dkk., 2008)



Gambar 12. 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 (2003) 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, 2002). 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)

G. 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.

G.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 pozolanik. *Fly ash* tergolong dalam limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun). Komposisi utama dari *fly ash* terdiri dari 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, 2001). 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 CO₂ 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 C618-93 yaitu:

a. Kelas C

Fly ash yang mengandung CaO > 10 %, dihasilkan dari pembakaran batubara *lignite* atau sub bitumen. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) > 50 %.

b. Kelas F

Fly ash yang mengandung CaO < 10 %, dihasilkan dari pembakaran batubara *anthracite* atau bitumen. *Fly ash* tipe ini memiliki kadar (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) > 70 %.

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. Selain itu juga berbagai hasil pembakaran yang mempunyai sifat pozzolan yang baik.

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. Gambar 13, menunjukkan gambar *fly ash* tipe c.



Gambar 13. *Fly ash* tipe C

G.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 dkk (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,2018). Larutan ini harus dibuat dan didiamkan setidaknya selama 24 jam sebelum pemakaian (Hardjito,2004).

2. Natrium Silikat (Na_2SiO_3)

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)).

G.3. 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)*.

G.4. 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 et al., 2005)

G.5. 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 Pirrolidon* (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

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

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. Gambar 14 menunjukkan gambar serat PVA.



Gambar 14. Serat PVA

H. Metode Sambungan

Bahan atau konektor yang saling terkait umumnya digunakan untuk menjamin sambungan yang memadai antara beton dan pelat baja. Selain itu, menggunakan konektor meningkatkan keuletan dan kinerja biaksial anggota SCS (*Steel Concrete Steel*) (Ameryan et al., 2020; Remennikov & Kong, 2020). Untuk memproduksi panel SCS beton ringan tipis (LWC) yang tahan terhadap beban benturan dan ledakan, konektor telah diusulkan dalam penelitian sebelumnya. Panel SCS dengan konektor menunjukkan perilaku yang menjanjikan saat mengalami beban statis dan benturan (Fam

& Sharaf, 2010). Konektor bertindak berpasangan dan mengunci inti beton di panel SCS. Dengan mekanisme *interlocking* ini, pengangkatan ke atas serta tekuk lokal pelat muka baja dapat dicegah. Pada anggota panel SCS dengan konektor baja, gaya geser melintang ditahan oleh beton dan konektor. Konektor bertindak sebagai penghubung geser untuk menghindari retak geser miring pada beton. Selain itu, kekuatan tarik konektor berkontribusi pada ketahanan geser lateral panel SCS. Fungsi lain dari konektor adalah kekuatan tariknya yang dapat digunakan untuk mengurangi tekuk lokal pelat muka baja dan menghindari pecahnya pelat baja dari beton. Tekuk lokal pelat baja dapat terjadi ketika panel SCS diuji di bawah tekanan, atau daerah tekanan pelat baja dikenai beban lentur. Pemisahan yang signifikan antara pelat baja dan beton terjadi ketika panel SCS diuji di bawah beban lateral atau ledakan beban (Fam & Sharaf, 2010). Oleh karena itu, konektor cukup dapat menghubungkan beton dan pelat baja, menghindari pemisahan tarik dan menjaga kinerja struktural secara keseluruhan. Akibatnya, ketahanan tarik konektor merupakan ciri vital yang akan mempengaruhi perilaku struktural panel SCS.

Manfaat utama dari konektor adalah menyediakan kapasitas geser untuk membatasi retak geser akibat gaya geser antara inti beton dan pelat baja di bawah beban lateral eksternal. Akhir-akhir ini, beragam jenis konektor telah ditemukan untuk meningkatkan kinerja geser anggota SCS (Yan et al.,2016; Zhang et al.,2005). Salah satunya menggunakan konektor geser yang dibaut. (Dallam,1968), melakukan studi eksperimental tentang

sambungan komposit baja-beton menggunakan baut kekuatan tinggi sebagai konektor geser. Pada penelitian ini, baut ditanam pada pelat beton. Konektor geser yang dibaut tidak menunjukkan slip pada beban layan dan memiliki kapasitas beban geser yang lebih tinggi dari beban geser stud penyambung. Gambar 15a, menunjukkan gambar baut dan Gambar 15b, gambar mur.



a. Baut



b. Mur

Gambar 15. Baut dan Mur