

**TESIS**

**PERILAKU PERKUATAN GESER BALOK BETON  
BERTULANG DENGAN VARIASI JARAK BAUT DAN  
KEBERADAAN WIREMESH PADA PANEL MORTAR  
GEOPOLYMER**

*Shear Strengthening Behaviour of Reinforced Concrete Beams with  
Varying Bolt Spacing and Wiremesh Presence in Geopolymer  
Mortar Panels*

**MUH. AFWAN IRSYAD  
D012 191 017**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**TESIS**

**PERILAKU PERKUATAN GESER BALOK BETON  
BERTULANG DENGAN VARIASI JARAK BAUT DAN  
KEBERADAAN WIREMESH PADA PANEL MORTAR  
GEOPOLYMER**

*Shear Strengthening Behaviour of Reinforced Concrete Beams with  
Varying Bolt Spacing and Wiremesh Presence in Geopolymer  
Mortar Panels*

**MUH. AFWAN IRSYAD  
D012 191 017**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**PENGAJUAN TESIS**

**PERILAKU PERKUATAN GESER BALOK BETON  
BERTULANG DENGAN VARIASI JARAK BAUT DAN  
KEBERADAAN WIREMESH PADA PANEL MORTAR  
*GEOPOLYMER***

Tesis

*Shear Strengthening Behavior of Reinforced Concrete Beams with  
Varying Bolt Spacing and Wiremesh Presence in Geopolymer Mortar  
Panels*

Disusun dan diajukan oleh

**MUH. AFWAN IRSYAD  
D012 191 017**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**TESIS**

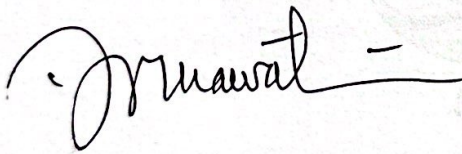
**PERILAKU PERKUATAN GESER BALOK BETON  
BERTULANG DENGAN VARIASI JARAK BAUT DAN  
KEBERADAAN *WIREMESH* PADA PANEL MORTAR  
*GEPOLYMER***

**MUH. AFWAN IRSYAD  
D012191017**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 18 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

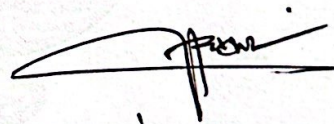
Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST., MT.  
NIP. 19720619 200012 2 001

Pembimbing Pendamping



Dr. Eng. Fakhruddin, ST., M.Eng  
NIP. 19870228 201903 1 005

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin



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

Ketua Program Studi  
S2 Teknik Sipil



Dr. M. Asad Abdurrahman, ST, MEng, PM  
NIP. 197303061998021001

## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN KELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : MUH. AFWAN IRSYAD  
Nomor Mahasiswa : D012 191 017  
Program studi : TEKNIK SIPIL

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis yang berjudul “PERILAKU PERKUATAN GESER BALOK BETON BERTULANG DENGAN VARIASI JARAK BAUT DAN KEBERADAAN *WIREMESH* PADA PANEL MORTAR *GEOPOLYMER*” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST., MT dan Dr. Eng. Ir. Fakhruddin, ST., M.Eng). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding (ISID - International Symposium on Infrasturcutre Development) sebagai artikel dengan judul “*Shear Strengthening Behavior of Reinforced Concrete Beams with Varying Bolt Spacing and Wiremesh Presence in Geopolymer Mortar Panels*”.

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

Gowa, Agustus 2023

Yang menyatakan,



Muh. Afwan Irsyad

## KATA PENGANTAR

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

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

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. H. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.,IPM** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Dr. Muhammad Asad Abdurrahman, ST., M. Eng. PM** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Ibu Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, S.T., MT., dan Bapak Dr. Eng. Fakhruddin, S.T., M.Eng.,** selaku dosen pembimbing I dan pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. 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 ibunda **Irmawati** dan Ayahanda **Sunardi** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu, serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan
2. Rekan-rekan di Laboratorium Riset Perkuatan Struktur, yang senantiasa membantu selama proses penelitian serta memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian penelitian ini.
3. Saudara-saudari teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Angkatan 2019.
4. Keluarga besar **Shape Studio** & Nur Istiqamah yang senantiasa memberikan warna yang begitu indah, dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan dari penelitian ini.

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

Gowa, 2023

Penulis

## ABSTRAK

**MUH. AFWAN IRSYAD.** *Perilaku Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Jarak Baut Dan Keberadaan Wiremesh Pada Panel Mortar Geopolymer* (Dibimbing oleh **Rita Irmawaty** dan **Fakhruddin**)

Pada penelitian ini diusulkan sistem perkuatan baru yang dapat memperbaiki kelemahan pada sistem perkuatan sebelumnya (seperti metode jacketing dan pemasangan FRP) dengan menggunakan panel mortar *Geopolymer*. Beton atau mortar *Geopolymer* memberikan keuntungan dalam hal pemanfaatan *fly ash* limbah industri hasil pembakaran batu bara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku geser serta pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat panel mortar geopolimer dengan variasi jarak antar baut dan keberadaan *wiremesh*. 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 4 buah yang terdiri dari balok CB, GM-W-200, GM-W-300, dan balok GM-NW-200. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan panel perkuatan dengan material mortar geopolimer dan serat PVA dengan keberadaan *wiremesh* yang diperkuat dengan jarak 200 mm (GM-W-200) mempengaruhi perilaku balok beton bertulang menjadi lebih daktail dan tidak lagi terjadi keruntuhan geser. Sedangkan pada balok GM-W-300 dan GM-NW-200 belum mampu memperbaiki perilaku lentur balok dan masih terjadi kegagalan geser seperti pada balok CB.

**Kata Kunci:** Balok beton bertulang, mortar *geopolymer*, serat PVA, perkuatan geser.



## ABSTRACT

**MUH. AFWAN IRSYAD.** *Shear Strengthening Behavior Of Reinforced Concrete Beams With Varying Bolt Spacing And Wiremesh Presence In Geopolymer Mortar Panels* (Supervised by **Rita Irmawaty** and **Fakhruddin**)

This research proposes a new reinforcement system that can improve the weaknesses of previous reinforcement systems (such as jacketing and FRP installation methods) by using Geopolymer mortar panels. Geopolymer concrete or mortar provides an advantage in using industrial waste fly ash from coal combustion. This study aims to analyze the shear behaviour, crack patterns, and failure modes of reinforced concrete beams reinforced with geopolymer mortar panels with variations in the spacing between bolts and the presence of wire mesh. Shear behaviour is discussed based on load-deflection behaviour, maximum load, steel load strain, and concrete load strain. The research phase is divided into the compressive strength testing of geopolymer mortar and the shear testing of reinforced concrete beams. The geopolymer mortar compressive strength test used 50x50x50 mm cube samples, tested at 3, 7, and 28 days. The geopolymer mortar was made with fly ash as the base material and activators, such as sodium hydroxide and sodium silicate. Meanwhile, the beam shear testing used 150x300 mm beam samples with a length of 2300 mm, as many as four pieces consisting of CB, GM-W-200, GM-W-300, and GM-NW-200 beams. The results showed that adding reinforcement panels with geopolymer mortar material and PVA fibers with wire mesh reinforced with a distance of 200 mm (GM-W-200) affected the behaviour of reinforced concrete beams to become more ductile and no longer occur shear collapse. Meanwhile, GM-W-300 and GM-NW-200 beams have not improved the bending behaviour of the beams, and shear failure still occurs as in CB beams.

**Keywords:** Reinforced Concrete (RC) beam, geopolymer mortar panel (GMP), PVA fibre, shear reinforcement

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>PENGAJUAN TESIS</b> .....	<b>ii</b>
<b>PERSETUJUAN TESIS</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TESIS</b> .....	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat penelitian .....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1 Penelitian Terdahulu .....	6
2.2 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang.....	8
2.3 Retak Pada Balok Beton Bertulang .....	11
2.4 Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang.....	13
2.5 Mortar .....	14
2.6 Mortar <i>Geopolymer</i> .....	17
2.8 Material Penyusun Panel Mortar <i>Geopolymer</i> .....	19
2.9 Serat PVA.....	22
2.10 <i>Wiremesh</i> .....	23
2.11 Metode Sambungan Baut .....	24

<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....</b>	<b>26</b>
3.2 Bagan Alir Penelitian .....	26
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	27
3.3.1 Pengujian Kuat Tekan Mortar <i>Geopolymer</i> .....	27
3.3.2 Pengujian Karakteristik Mekanis Mortar .....	28
3.3.3 Pengujian Karakteristik Mekanis Tulangan .....	29
3.3.4 Pengujian Karakteristik Mekanis Beton .....	29
3.3.5 Pengujian Geser Balok.....	30
3.4 Benda Uji .....	32
3.4.1 Pengujian Kuat Tekan Mortar <i>Geopolymer</i> .....	32
3.4.2 Pengujian Geser Balok .....	37
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>42</b>
4.1 Kuat Tekan Mortar <i>Geopolymer</i> .....	42
4.2 Kuat Tarik Belah Mortar <i>Geopolymer</i> .....	44
4.3 Karakteristik Mekanis Beton .....	45
4.4 Karakteristik Mekanis Tulangan .....	46
4.5 Pengujian Geser Balok Beton Bertulang .....	47
4.5.1 Hubungan Beban Lendutan .....	47
4.5.2 Beban Maksimum.....	51
4.6 Hubungan Beban Regangan .....	53
4.6.1 Hubungan Beban dan Regangan Tulangan Tarik .....	53
4.6.2 Hubungan Beban dan Regangan Tulangan Geser.....	54
4.6.3 Hubungan Beban dan Regangan Beton.....	55
4.7 Pola Retak dan Mode Kegagalan .....	56
4.7.1 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok CB .....	56
4.7.2 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok GM-W-200 .....	58
4.7.3 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok GM-W-300 .....	61
4.7.4 Pola Retak dan Mode Kegagalan Balok GM-NW-200.....	64
4.8 Perbandingan Hasil Teoritis dan Eksperimental.....	66
4.9 Perhitungan Baut dan Mur .....	70

<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>75</b>
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	75
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>77</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1.</b> Lebar retak maksimum yang diizinkan (ACI 224R-01).....	13
<b>Tabel 2.</b> Persyaratan spesifikasi proporsi mortar .....	16
<b>Tabel 3.</b> Persyaratan spesifikasi sifat mortar .....	17
<b>Tabel 4.</b> Karakter fisik PVA.....	22
<b>Tabel 5.</b> Komposisi kimia fly ash (persen terhadap berat).....	33
<b>Tabel 6.</b> Klasifikasi fly ash berdasarkan ASTM C 618 [1] .....	33
<b>Tabel 7.</b> Properti dari PVA fiber .....	34
<b>Tabel 8.</b> Komposisi campuran mortar <i>Geopolymer</i> .....	35
<b>Tabel 9.</b> Variasi benda uji balok.....	37
<b>Tabel 10.</b> Mix desain beton normal per m <sup>3</sup> .....	38
<b>Tabel 11.</b> Hasil pengujian kuat tekan mortar <i>geopolymer</i> dengan penambahan serat PVA 0.6% pada umur 3, 7, dan 28 hari.....	43
<b>Tabel 12.</b> Hasil pengujian tarik belah mortar <i>geopolymer</i> pada umur 28 hari .....	45
<b>Tabel 13.</b> Hasil pengujian kuat tekan beton umur 28 hari.....	46
<b>Tabel 14.</b> Hasil pengujian kuat tarik baja.....	47
<b>Tabel 15.</b> Rekapitulasi hubungan beban-lendutan.....	49
<b>Tabel 16.</b> Kontribusi kapasitas geser balok beton bertulang .....	52
<b>Tabel 17.</b> Rekapitulasi perbandingan kapasitas geser eksperimen dan analitis ...	69

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.</b> Balok kekuatan TRGM dengan angkur strip baja .....	6
<b>Gambar 2.</b> Setup pengujian lentur balok .....	6
<b>Gambar 3.</b> Modus kegagalan dan pola retak dari balok yang diuji .....	7
<b>Gambar 4.</b> Balok beton bertulang dengan HCP .....	8
<b>Gambar 5.</b> Perlawanan terhadap geseran sebelum penambahan panel kekuatan .	9
<b>Gambar 6.</b> Perlawanan terhadap geseran setelah penambahan panel kekuatan .	10
<b>Gambar 7.</b> Perlawanan terhadap geseran setelah penambahan panel kekuatan yang disertai dengan <i>wiremesh</i> .....	11
<b>Gambar 8.</b> Jenis retakan pada beton .....	12
<b>Gambar 9.</b> Diagram keruntuhan balok .....	14
<b>Gambar 10.</b> Ikatan polimerisasi pada <i>geopolymer</i> secara umum .....	17
<b>Gambar 11.</b> <i>Fly Ash</i> .....	19
<b>Gambar 12.</b> Natrium hidroksida (NaOH) .....	20
<b>Gambar 13.</b> Natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) .....	21
<b>Gambar 14.</b> <i>Superplasticizer polycarboxylate (Plastiment Vz)</i> .....	21
<b>Gambar 15.</b> Boraks .....	22
<b>Gambar 16.</b> <i>Polyvinyl Alcohol</i> .....	23
<b>Gambar 17.</b> <i>Wiremesh</i> .....	23
<b>Gambar 18.</b> Baut dan mur .....	25
<b>Gambar 19.</b> Diagram alir pembuatan benda uji panel mortar <i>geopolymer</i> .....	26
<b>Gambar 20.</b> Diagram alir pembuatan benda uji .....	27
<b>Gambar 21.</b> Dimensi benda uji .....	28
<b>Gambar 22.</b> <i>Universal Testing Machine (UTM)</i> .....	29
<b>Gambar 23.</b> Dimensi benda uji .....	29
<b>Gambar 24.</b> LVDT .....	30
<b>Gambar 25.</b> <i>Strain gauge</i> baja dan <i>CN Adhesive</i> .....	30
<b>Gambar 26.</b> Alat ukur regangan beton ( <i>Strain gauge beton</i> ) .....	31
<b>Gambar 27.</b> Alat <i>Load cell</i> dan <i>Data logger</i> .....	31
<b>Gambar 28.</b> Komposisi mortar <i>geopolymer</i> .....	32

<b>Gambar 29.</b> Partikel <i>fly ash</i> hasil pengujian SEM.....	33
<b>Gambar 30.</b> NYCON-PVA RECS 15.....	35
<b>Gambar 31.</b> Material yang digunakan pada penelitian.....	36
<b>Gambar 32.</b> Pengadukan campuran pada <i>mixer</i> .....	36
<b>Gambar 33.</b> Benda uji kubus.....	37
<b>Gambar 34.</b> Dimensi benda uji balok.....	38
<b>Gambar 35.</b> Pabrikasi benda uji balok beton bertulang.....	39
<b>Gambar 36.</b> Proses pengecoran mortar <i>geopolymer</i> .....	40
<b>Gambar 37.</b> <i>Setup</i> benda uji.....	41
<b>Gambar 38.</b> Penimbangan benda uji mortar <i>geopolymer</i> .....	42
<b>Gambar 39.</b> Pengujian kuat tekan mortar <i>geopolymer</i> .....	42
<b>Gambar 40.</b> Kuat tekan mortar <i>geopolymer</i> .....	43
<b>Gambar 41.</b> Penimbangan benda uji.....	44
<b>Gambar 42.</b> Pengujian kuat tarik belah mortar <i>geopolymer</i> .....	44
<b>Gambar 43.</b> Uji kuat tekan.....	45
<b>Gambar 44.</b> Hubungan beban-lendutan sampel.....	48
<b>Gambar 45.</b> Beban maksimum.....	51
<b>Gambar 46.</b> Hubungan beban-regangan tulangan tarik.....	53
<b>Gambar 47.</b> Hubungan beban-regangan tulangan geser.....	54
<b>Gambar 48.</b> Hubungan beban-regangan beton.....	55
<b>Gambar 49.</b> Retak awal balok kontrol (CB).....	56
<b>Gambar 50.</b> Retak awal balok kontrol (CB).....	56
<b>Gambar 51.</b> Retak awal daerah geser.....	57
<b>Gambar 52.</b> Lebar retak diagonal.....	57
<b>Gambar 53.</b> Retak utama pada balok CB.....	57
<b>Gambar 54.</b> Pola retak dan model kegagalan balok GM-W-200 sebelum panel dilepas.....	58
<b>Gambar 55.</b> Pola retak dan model kegagalan balok GM-W-200 setelah panel dilepas.....	58
<b>Gambar 56.</b> Retak awal pada balok GM-W-200.....	59
<b>Gambar 57.</b> Retak pada panel mortar <i>geopolymer</i> .....	60

<b>Gambar 58.</b> Bentang geser balok beton bertulang setelah panel dilepas.....	61
<b>Gambar 59.</b> <i>Concrete Crushing</i> pada balok GM-W-200 .....	61
<b>Gambar 60.</b> Pola retak dan model kegagalan balok GM-W-300 sebelum panel dilepas .....	62
<b>Gambar 61.</b> Pola retak dan model kegagalan balok GM-W-300 setelah panel dilepas .....	62
<b>Gambar 62.</b> Retak awal pada balok GM-W-300 .....	63
<b>Gambar 63.</b> Retak diagonal utama pada balok GM-W-300 .....	63
<b>Gambar 64.</b> Pola retak dan model kegagalan balok GM-NW-200 sebelum panel dilepas .....	64
<b>Gambar 65.</b> Pola retak dan model kegagalan balok GM-NW-200 setelah panel dilepas .....	64
<b>Gambar 66.</b> Retak awal pada balok GM-NW-200 .....	65
<b>Gambar 67.</b> Retak awal pada panel mortar <i>geopolymer</i> .....	65
<b>Gambar 68.</b> Kehancuran pada balok GM-NW-200.....	66
<b>Gambar 69.</b> Dimensi benda uji .....	66
<b>Gambar 70.</b> Dimensi benda uji .....	70



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu tantangan utama industri konstruksi adalah rehabilitasi dan perbaikan struktur yang sudah ada, terutama untuk member struktur yang mengalami kegagalan geser. Kegagalan geser pada balok beton bertulang terjadi secara tiba-tiba dan oleh karena itu memiliki dampak bencana. Kerusakan pada struktur dapat terjadi diakibatkan oleh umur struktur atau sebagai akibat dari perubahan pembangunan, perubahan pembebanan, perubahan fungsi bangunan atau akibat pengaruh lingkungan seperti korosi, erosi, pencairan, pembekuan dan bencana alam seperti gempa bumi (Al-Bazoon et al., 2022).

Sejumlah besar struktur balok beton bertulang membutuhkan penguatan atau rehabilitasi. Di antara mode kegagalan yang umum terjadi, kegagalan geser lebih berbahaya dan kurang dapat diprediksi, karena biasanya bersifat getas dan runtuh secara tiba-tiba. Oleh karena itu, ada kebutuhan untuk meningkatkan kapasitas geser dan daktilitas lokal balok beton bertulang (Ojaimi, 2021).

Salah satu teknik perbaikan dan rehabilitasi struktur yang umum digunakan adalah metode plat baja atau metode *jacketing* karena kemampuannya untuk meningkatkan kapasitas beban dan kekakuan. Namun, beberapa tantangan yang terkait dengan teknik ini adalah meningkatnya kebutuhan tenaga kerja dan waktu konstruksi; dan peningkatan ketebalan akhir dari elemen balok beton bertulang yang diperbaiki yang dapat berdampak pada sifat dinamis struktur (Abadel, 2021; Ojaimi, 2021).

Studi eksperimental dengan penggunaan material *Fiber-reinforced Polymer* (FRP) merupakan metode yang efektif untuk meretrofit struktur balok beton bertulang (Mhanna et al., 2019). FRP sangat meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang, memiliki sifat fisik dan mekanik yang luar biasa seperti kekuatan tarik yang tinggi terhadap rasio berat serta sifatnya yang tidak korosif (Al-Bazoon et al., 2022). Namun, ketahanannya yang buruk terhadap paparan suhu tinggi, aplikasi yang tidak efisien di lingkungan yang lembab serta mutu beton yang

rendah, ketidakcocokan dengan substrat beton, dan kemungkinan kegagalan mendadak tanpa peringatan.

Konsep geopolimer (GPC) telah muncul selama dua dekade terakhir sebagai alternatif potensial yang ramah lingkungan untuk semen portland biasa (Matsimbe et al., 2022). Material geopolimer tidak hanya memiliki sifat mekanik yang sangat baik, tetapi juga memiliki serangkaian sifat yang sangat baik seperti tahan api dan tahan korosi. Sebagian besar limbah padat industri dan abu dasar pembakaran sampah ditumpuk yang tidak hanya menghabiskan sumber daya lahan, tetapi juga berdampak buruk pada lingkungan. Mendaur ulangnya dapat digunakan sebagai bahan baku untuk menyiapkan geopolimer (Cong & Cheng, 2021).

*Geopolymer* (GPC) lebih tahan terhadap suhu tinggi daripada beton OPC. Penggunaan beton geopolymer memiliki durabilitas kerja jangka panjang dan dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> (Ghadir et al., 2021; Suksiripattanapong et al., 2021). Beton *geopolymer* (GPC) terdiri dari bahan kaya aluminosilikat yang diperoleh dari bahan limbah seperti abu terbang (*fly ash*), terak tanur sembur, dan lumpur merah serta larutan alkali. Aluminosilikat dan larutan alkali bereaksi bersama (Yacob et al., 2019). Beton geopolimer merupakan material konstruksi ramah lingkungan yang berpotensi untuk diaplikasikan pada struktur bangunan. Penting untuk memahami perilaku struktural beton geopolimer. Oleh karena itu, efisiensi dalam memproduksi beton geopolimer sangat bergantung pada aktivator serta jenis sumber aluminosilikat (Herwani et al., 2022).

Pembuatan *geopolymer* secara umum dilakukan dengan menggunakan *fly ash* (FA) sebagai bahan dasar utamanya (Permata & Wardhono, 2019). FA tersedia secara luas di seluruh dunia memungkinkan digunakan untuk memproduksi beton ramah lingkungan generasi berikutnya untuk konstruksi modern. Penggunaan FA yang hemat biaya dan mudah didapat sebagai pengisi mineral pada beton memberikan banyak keuntungan untuk mengurangi konsumsi semen portland biasa (OPC), FA-GPC merupakan material komposit rekayasa yang relatif baru, revolusioner, dan berkelanjutan dengan beberapa manfaat, termasuk kekuatan awal yang tinggi dan sifat daya tahan yang lebih baik (seperti berkurangnya kemampuan

menyerap air) terhadap lingkungan yang agresif. Produksi beton yang berkelanjutan dan lebih ramah lingkungan telah menjadi perhatian utama dalam industri konstruksi secara global (Amran et al., 2021).

Namun, FA pada dasarnya rapuh sehingga perlu ditambahkan serat untuk meningkatkan daktilitas dan kapasitas menahan beban struktur. Salah satu serat yang menjadi perhatian adalah serat PVA (*polyvinyl alcohol*) karena kekuatan tariknya yang tinggi, modulus *young* yang mirip dengan beton. Polivinil alkohol (PVA) adalah polimer yang larut dalam air, yang diproduksi 650.000 ton/tahun untuk aplikasi bahan konstruksi. Beberapa peneliti telah menggunakan PVA untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton. Sifat mekanik material yang disemen dapat ditingkatkan dengan PVA karena pengurangan porositas yang dihasilkan dari reaksi kimia antara PVA dan semen (Suksiripattanapong et al., 2021).

Penelitian ini mengembangkan penggunaan mortar *Geopolymer* dengan serat PVA sebagai bahan penguat yang diusulkan yang disebut dengan panel mortar *Geopolymer* (GMP). Untuk meningkatkan kapasitas geser balok, dilakukan dengan menambahkan *wiremesh* 5 mm pada panel mortar *Geopolymer*. Pengaplikasian panel mortar *Geopolymer* pada balok beton bertulang adalah dengan memasang panel mortar *Geopolymer* pada kedua sisi balok dengan cara diangkur pada 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 *Geopolymer* adalah jarak antara baut. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka penelitian ini dirancang dengan judul:

**“Perilaku Perkuatan Geser Balok Beton Bertulang dengan Variasi Jarak Baut dan Keberadaan *Wiremesh* pada Panel Mortar *Geopolymer*”**

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar *Geopolymer* dan serat PVA dengan variasi jarak baut dan keberadaan

*wiremesh?*

2. Bagaimana pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar *Geopolymer* dan serat PVA dengan variasi jarak baut dan keberadaan *wiremesh?*

### 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar *Geopolymer* dan serat PVA dengan variasi jarak baut dan keberadaan *wiremesh*.
2. Menganalisis pola retak dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar *Geopolymer* dan serat PVA dengan variasi jarak baut dan keberadaan *wiremesh*.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan terhadap benda uji balok beton bertulang yang diperkuat dengan Panel Mortar *Geopolymer* dan penambahan 0.6% serat PVA.
2. Mortar *Geopolymer* diproduksi dengan mencampurkan *fly ash*, pasir, NaOH,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , *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 *Geopolymer* dengan dimensi 15 mm x 300 mm x 700 mm yang diberikan wiremesh M5.
5. Dimensi balok 150 mm x 300 mm x 2300 mm
6. Sambungan Baut menggunakan Baut diameter 8 mm dengan standar SNI.
7. Benda Uji diberi beban lentur dengan beban dua titik pembebanan secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 1500 kN.

## 1.5 Manfaat penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Ketersediaan *Fly ash* yang cukup besar dan perlu dimanfaatkan sebagai bahan pengganti semen untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub>. Sehingga adanya penelitian ini diharapkan dapat memberi solusi sebagai upaya pencegahan kerusakan lingkungan dan dapat dijadikan acuan dalam perencanaan beton ramah lingkungan berbasis *fly ash* dalam industri beton.
2. Bahan referensi bagi peneliti selanjutnya untuk pengembangan beton berbasis *fly ash* yang ramah lingkungan (*Green concrete*).

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan terdapat 5 pokok bahasan yaitu:

### BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini memberikan penjelasan singkat tentang latar belakang yang mendasari pemilihan judul penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan manfaat penelitian. Bab I juga mengurai secara singkat sistematika penulisan bab ini.

### BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berupa penjelasan dasar teori yang relevan dengan penelitian.

### BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas langkah-langkah mengenai tahapan, pengumpulan data bahan penelitian, lokasi penelitian, dan pengujian yang dilakukan.

### BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengujian serta analisis data yang diperoleh.

### BAB V. PENUTUP

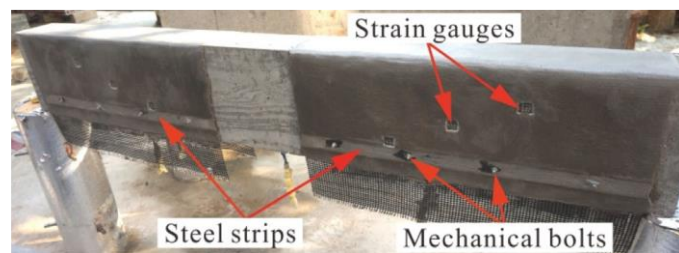
Bab penutup yang menyajikan kesimpulan dari hasil analisis masalah serta saran-saran yang diperlukan untuk kesempurnaan penelitian ini.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

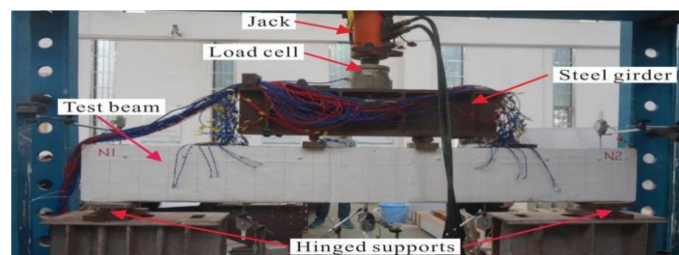
### 2.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terkait kekuatan balok yang telah terpublikasi, diantaranya:

1. Penelitian oleh Hai Yan Zhang dkk (2019) melaporkan hasil pengujian terdapat peningkatan kapasitas geser masing-masing 47% dan 106% pada satu dan dua lapisan dari kekuatan TRGM (textile reinforced *Geopolymer* mortar) dibandingkan dengan balok tanpa kekuatan. Ketika angkur strip baja digabungkan kapasitas geser dapat meningkat 15-21%. Karakteristik dari TRGM sangat tahan terhadap api, tahan terhadap korosi, dan tahan cuaca yang baik sehingga dipercaya dapat dijadikan sebagai alternatif dalam retrofit dan kekuatan beton bertulang.



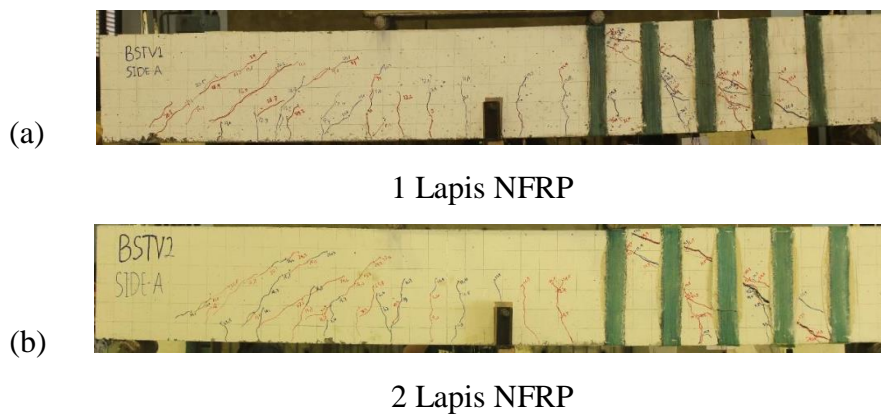
**Gambar 1.** Balok kekuatan TRGM dengan angkur strip baja



**Gambar 2.** Setup pengujian lentur balok

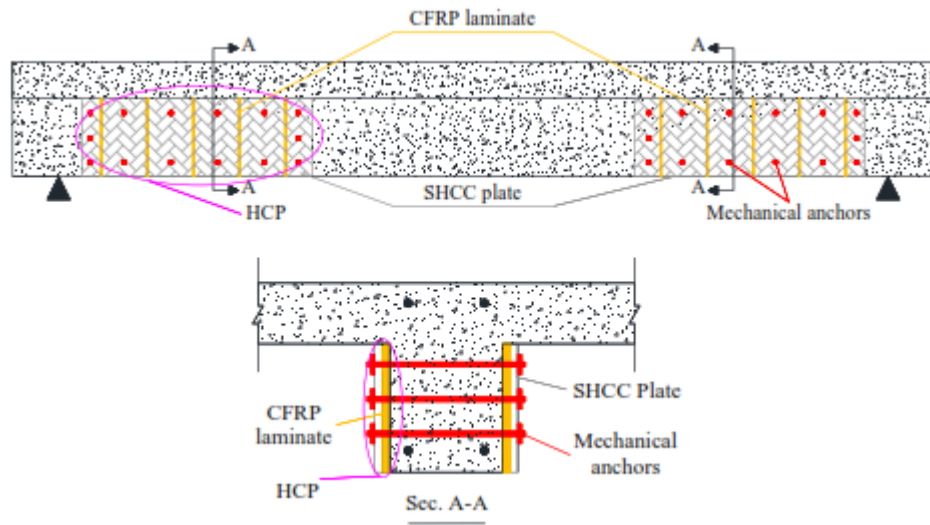
2. T. Saidi (2020) melakukan penelitian tentang pengaruh jumlah lapisan serat abaka sebagai bahan FRP alami untuk kekuatan geser balok beton bertulang. Dua balok diperkuat geser yang terikat secara eksternal dengan jumlah

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 abaca sebagai bahan NFRP untuk balok yang diperkuat geser meningkat 9,78% dan 9,92% beban maksimum. Bahan NFRP komposit serat abaca 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.



**Gambar 3.** Modus kegagalan dan pola retak dari balok yang diuji

3. Penelitian Sreenivas *et al.*,(2021) mengenai 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), hal ini memberikan kapasitas kekuatan tarik yang diperlukan untuk HCP. Gambar4, menunjukkan benda balok beton bertulang yang diberikan perkuatan geser dengan teknik HCP.



**Gambar 4.** Balok beton bertulang dengan HCP

## 2.2 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang

### 2.2.1 Kapasitas Geser Sebelum Penambahan Panel Perkuatan

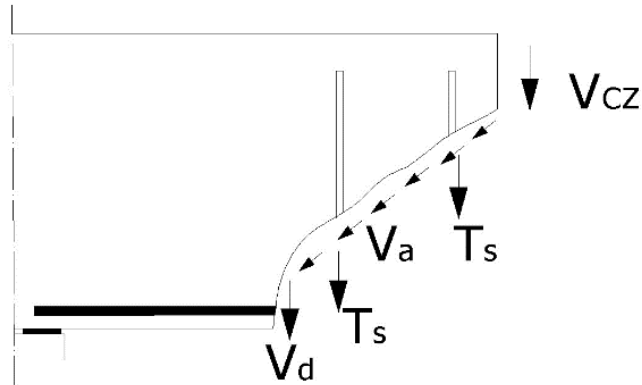
Geser yang terjadi dalam beton seringkali diikuti oleh desak dan tarik lenturan. Bentang geser adalah kejadian geser pada balok beton tanpa tulangan, dimana kegagalan biasanya terjadi pada sekitar tiga kali tinggi efektif balok. Peringatan dini kegagalan geser adalah munculnya retak tarik pada balok tanpa tulangan geser. Kerusakan akibat geser, hancur dan terbelah disebabkan oleh garis geser yang lebih pendek, sedangkan balok tanpa tulangan geser, dengan garis geser yang lebih panjang, menyebabkan kerusakan akibat tegangan lentur.

Retak miring balok adalah permulaan dari runtuh geser, yang terjadi terutama pada balok pendek, dimana fraktur terjadi secara tiba-tiba tanpa tanda-tanda awal. Terdapat dua jenis tekuk miring, yaitu retak geser badan (*body shear buckling*), yang tidak melengkung, dan retak lentur (*flexural buckling*), yang terjadi sebagai kelanjutan dari proses retak sebelumnya. Proses lendutan lentur ditandai dengan arah tegak lurus mulai dari tepi ke bagian dalam balok. Proses ini terus berlanjut hingga, pada akhir perlekatan yang lebih dalam, terjadi tegangan lentur dan geser, yang menghasilkan retak miring (Dipohusodo, 1994). Penahan pergeseran beton



menurut WC & Kusuma, (1995) yaitu :

- 1) Aksi pasak ( $V_d$ ) sebagai perlawanan dari tulangan
- 2) Gaya *interlocking* atau transfer geser pada retak miring
- 3) Perlawanan geser pada daerah tekan yang belum retak ( $V_{cz}$ ).
- 4) Gaya ( $T_s$ ) yang terdapat dalam tulangan geser



**Gambar 5.** Perlawanan terhadap geseran sebelum penambahan panel perkuatan

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),

$\phi$  = faktor reduksi.

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

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

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 kearah sejajar tulangan pokok penampang (mm)

$f_y$  = Kuat leleh tulangan geser (MPa).

Tetapi kuat geser  $V_s$  tidak boleh diambil lebih dari nilai

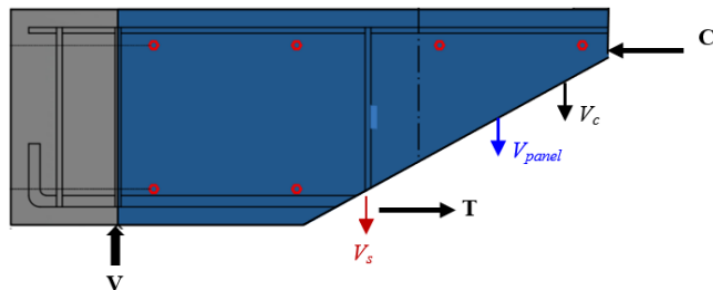
$$V_s = \left(\frac{2}{3}\right) \sqrt{f'c} b_w d \dots\dots\dots(4)$$

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

### 2.2.2 Kapasitas Geser Setelah Penambahan Panel Perkuatan



**Gambar 6.** 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

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

Dimana:

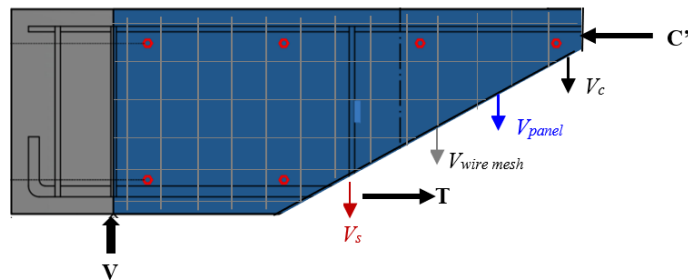
$V_u$  = gaya geser berfaktor (kN),

$V_c$  = 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),  
 $\phi$  = faktor reduksi.

### 2.2.3. Kapasitas Geser Setelah Penambahan Panel Perkuatan Disertai Dengan *Wiremesh*



**Gambar 7.** Perlawanan terhadap geseran setelah penambahan panel perkuatan yang disertai dengan *wiremesh*

Dengan adanya penambahan panel perkuatan yang disertai dengan *wiremesh*, kontribusi dari kapasitas geser yang disumbangkan oleh panel perkuatan tersebut perlu diperhitungkan. Sehingga, persamaan (7) dapat ditulis menjadi:

$$\phi V_n \geq V_u \text{ atau } V_n = V_c + V_s + V_p + V_w \dots\dots\dots(7)$$

Dimana:

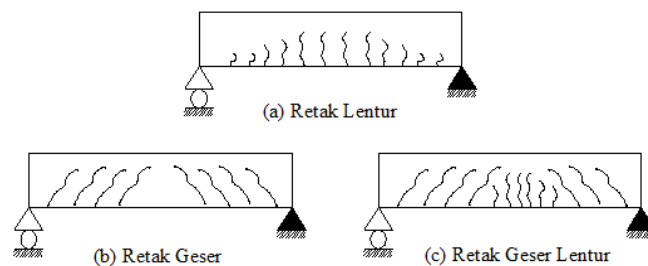
- $V_u$  = gaya geser berfaktor (kN),  
 $V_c$  = kekuatan geser yang disumbangkan oleh beton (kN),  
 $V_s$  = kekuatan geser yang disumbangkan oleh tulangan (kN),  
 $V_p$  = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh panel perkuatan(kN)  
 $V_w$  = Kekuatan geser yang disumbangkan oleh *wiremesh* (kN)  
 $V_n$  = kekuatan geser nominal (kN),  
 $\phi$  = faktor reduksi.

### 2.3 Retak Pada Balok Beton Bertulang

Retak dapat terjadi pada beton pada awal pembebanan akibat kelemahan tarik beton. Parameter terpenting yang mempengaruhi retak geser dan lebar retak adalah

tegangan lekatan antara baja tulangan dan beton di sekitarnya. Ukuran retak dapat dibatasi dengan mendistribusikan tulangan. Ada 3 jenis keretakan yang terjadi pada balok (Gilbert *et al.*, 1990), yaitu :

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi pada zona dimana momen lentur tinggi dan gaya geser rendah. Arah retakan hampir tegak lurus terhadap sumbu balok (Gambar 8(a)). Retak lentur adalah retak vertikal yang dimulai dari sisi tegangan balok dan mengarah ke daerah sekitar sumbu netral. Jika balok sangat tinggi, jarak antar retakan akan sangat dekat dan beberapa retakan akan meluas sampai ke bagian atas tulangan, sementara yang lain tidak. Retak-retak ini akan lebih lebar di bagian tengah balok daripada di bagian bawah.
2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yang terjadi pada zona netral penampang dimana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil (gambar 8(b)). Retak geser dapat disebabkan oleh gaya geser dan dapat terjadi pada material balok beton bertulang sebagai retak bebas atau sebagai perluasan retak lentur. Retak geser terkadang dapat terjadi pada bagian penampang prategang, terutama pada penampang dengan flens yang besar dan penampang yang tipis.
3. Retak geser-lentur (*flexural shear crack*), yang terjadi pada penampang balok yang telah mengalami retak lentur, yang merupakan perpanjangan dari retak miring dan retak lentur sebelumnya (Gambar 8(c)).



**Gambar 8.** Jenis retakan pada beton

**Tabel 1.** Lebar retak maksimum yang diizinkan (ACI 224R-01)

Kondisi Paparan Balok	Lebar Retak	
	In	Mm
Udara kering atau membran pelindung	0.016	0,41
Kelembaban, udara lembab, tanah	0.012	0.30
Larutan bahan kimia	0.007	0.18
Air laut dan percikan air laut	0.006	0.15
Struktur penahan air	0.004	0.10

#### 2.4 Kegagalan Pada Balok Beton Bertulang

Melelehnya tulangan baja dan hancurnya beton bertulang mempengaruhi kegagalan pada balok beton. Penyebab kegagalan balok beton bertulang umumnya 3 kemungkinan (Nawy, 2010) :

1) Kondisi *Balanced Reinforced*

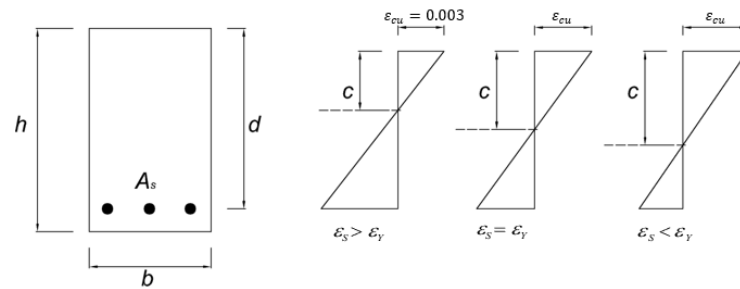
Saat beton mencapai regangan batasnya, tulangan tarik mulai meleleh.

2) Kondisi *Over-Reinforced*

Terjadi apabila dalam keadaan *balanced*, tulangan yang digunakan lebih banyak dari yang diperlukan. Keruntuhan dimulai dengan hancurnya penampang beton terlebih dahulu kemudian baja meleleh.

3) Kondisi *Under-Reinforced*

Terjadi apabila dalam keadaan *balanced*, tulangan tarik yang digunakan pada balok lebih sedikit dari yang diperlukan. Keruntuhan ditandai dengan melelehnya tulangan baja sebelum beton. Elemen struktur harus direncanakan dalam kondisi tulangan kurang ketika merencanakan elemen struktur.



**Gambar 9.** Diagram keruntuhan balok

## 2.5 Mortar

Mortar adalah komposisi tertentu kombinasi campuran yang terdiri dari pasir, bahan perekat (tanah liat, kapur dan semen Portland), dan air yang diaduk menggunakan mesin pengaduk (SNI 03-6825-2002). Mortar bertujuan untuk menggabungkan unit pasangan menjadi satu kesatuan sehingga dapat berfungsi sebagai komponen yang memiliki karakteristik kinerja fungsional. Adapun jenis mortar, yaitu:

- a. Mortar lumpur adalah terbuat dari campuran pasir, lumpur/tanah liat dan air. Semua bahan atau logam ini dicampur bersama dalam rasio yang diperhitungkan dengan cermat. Karena jika pasir yang digunakan terlalu sedikit keretakan pada dinding ketika mengeras. Demikian pula, terlalu banyak pasir dapat menyebabkan mortar kurang merekat.
- b. Mortar kapur, terbuat dari campuran pasir, kapur dan air. Kapur dan pasir dicampur hingga kering lalu ditambahkan air. Biasanya pasir yang digunakan tiga kali lebih banyak dari kapur karena kapur menyusut selama proses adhesi.
- c. Mortar semen, terbuat dari campuran semen portland, pasir dan air dengan proporsi yang tepat. Perbandingan antara jumlah semen dan jumlah pasir adalah antara 1:2 dan 1:6. Mortar semen lebih kuat dari mortar tanah liat dan kapur dan biasanya digunakan untuk dinding, kolom, atau bagian yang menahan beban lainnya. Karena sifatnya yang kedap air, mortar semen dapat digunakan untuk bagian eksterior dan bawah tanah. Perbandingan antara

volume semen dan volume pasir antara 1:2 hingga 1:6.

- d. Mortar khusus, yang dibuat dengan menambahkan bahan khusus seperti asbes, serat, serat rami, pelet kayu, serbuk gergaji dan sebagainya untuk tujuan tertentu. Sebagai contoh, menambahkan debu bata tahan api ke dalam semen aluminium menghasilkan mortar tahan api.

Mortar untuk adukan pasangan terdapat 5 tipe menurut ASTM C270 (SNI 6882:2014), yaitu:

- a. Mortar tipe M, direkomendasikan untuk pasangan bata bertulang dan tidak bertulang karena kekuatan tekannya yang tinggi, yaitu minimal 17,2 MPa.
- b. Mortar tipe S, direkomendasikan untuk struktur di atas atau di bawah permukaan tanah yang dapat menahan beban tekan normal tetapi memiliki kekuatan lentur yang diperlukan untuk menahan beban lateral yang tinggi akibat tekanan tanah, angin, dan gempa bumi. Kekuatan tekan minimum tipe ini adalah 12,4 MPa.
- c. Mortar tipe N, direkomendasikan untuk pasangan bata umum dan struktur pasangan bata di atas tanah, seperti dinding penahan beban interior dan eksterior, karena kekuatan rata-ratanya memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan tekan dan lentur, kemudahan pengerjaan, dan ekonomis, dengan kekuatan tekan minimum 5,2 MPa.
- d. Mortar tipe O, direkomendasikan untuk dinding non-beban interior dan eksterior pada struktur yang tidak akan membeku dalam kondisi lembab atau jenuh. Kuat tekan minimum 2,4 MPa.
- e. Mortar tipe K

Mortar tipe K, jarang digunakan pada konstruksi baru karena kekuatan tekan dan lenturnya yang sangat rendah. ASTM C270 direkomendasikan hanya untuk bangunan tua yang menggunakan mortar kapur. Kekuatan tekan minimum adalah 5,2 MPa.

Adapun spesifikasi masing - masing tipe mortar berdasarkan ASTM C270 disajikan dalam Tabel 2 dan Tabel 3.

**Tabel 2.** Persyaratan spesifikasi proporsi mortar

Mortar	Tipe	Campuran dalam volume (bahan bersifat semen)							Kapur Padam atau kapur Pasta	Rasio agregat (Pengukuran pada kondisi lembab atau gembur)
		Semen Portland/ semen campur	Semen Mortar			Semen Pasangan				
			M	S	N	M	S	N		
	M	1	...	...	...	...	...	...	1/4	
	S	1	...	...	...	...	...	...	> 1/4 sampai 1/2	
	N	1	...	...	...	...	...	...	> 1/2 sampai 1 1/4	
Semen Kapur	O	1	...	...	...	...	...	...	> 1 1/4 sampai 2 1/2	Tidak kurang dari 2 1/4 dan tidak lebih dari 3 kali jumlah darivolume terpisah material sementisius
	M	1	...	...	1	...	...	...		
	M	...	1	...	...	...	...	...		
	S	1/2	...	...	1	...	...	...		
Semen Mortar	S	...	...	1	...	...	...	...		
	N	...	...	...	1	...	...	...		
	O	...	...	...	1	...	...	...		
	M	1	...	...	...	...	...	1		
	M	...	...	...	...	1	...	...		
	S	1/2	...	...	...	...	...	1		
Semen Pasangan	S	...	...	...	...	...	1	...		
	N	...	...	...	...	...	...	1		
	O	...	...	...	...	...	...	1		

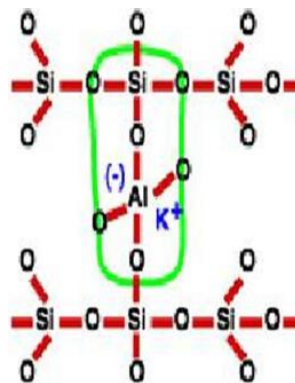


**Tabel 3.** Persyaratan spesifikasi sifat mortar

Mortar	Tipe	Kekuatan tekan rata-rata pada umur 28 hari, min, MPa(psi)	Retensi air, min,%	Kadar udara, maks, %B	Rasio agregat (diukur dalam kondisi lembab, lepas)
	M	17,2 (2 500)	75	12	
Semen-	S	12,4 (1 800)	75	12	
Kapur	N	5,2 (750)	75	14C	
	O	2,4 (350)	75	14C	
	M	17,2 (2 500)	75	12	Tidak kurang dari 2¼ dan tidak lebih dari 3½ jumlah dari volume terpisah material sementisius
Semen	S	12,4 (1 800)	75	12	
Mortar	N	5,2 (750)	75	14C	
	O	2,4 (350)	75	14C	
	M	17,2 (2 500)	75	18	
Semen	S	12,4 (1 800)	75	18	
Pasangan	N	5,2 (750)	75	20D	
	O	2,4 (350)	75	20D	

## 2.6 Mortar Geopolymer

Mortar *Geopolymer* dalam penelitian ini sebagai pengembangan yang digunakan untuk bahan pengikat. Material geopolimer tidak hanya memiliki sifat mekanik yang sangat baik, tetapi juga memiliki serangkaian sifat yang sangat baik seperti tahan api dan tahan korosi.

**Gambar 10.** Ikatan polimerisasi pada *geopolymer* secara umum

Geopolimerisasi adalah sintesis senyawa aluminosilikat anorganik melalui polimerisasi, di mana rantai terbentuk dalam bentuk struktur polimer Si-O-Al-O tiga dimensi (polialat). Aluminium (Al) dan silika (Si) berperan penting dalam ikatan polimer (Davidowitz, 1994). Salah satu parameter dari proses polimerisasi adalah reaktan yang digunakan - SiO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O dan NaOH (Fansuri dkk., 2008).

*Geopolymer* menggunakan lebih sedikit energi daripada OPC dan memiliki fleksibilitas bahan baku yang sangat tinggi (Komnitsas & Zaharaki, 2007). Semua bahan aluminosilikat padat, baik mineral alam, bahan sintetis maupun limbah anorganik, digunakan dalam sintesis geopolimer (Xu & Van Deventer, 2003). Geopolimer dianggap ramah lingkungan karena menggunakan bahan yang berasal dari limbah industri dan proses produksinya yang rendah dalam konsumsi energi dan tidak memerlukan proses pembakaran pada suhu hingga 800°C (Davidovits, 1994).

Material yang kaya akan silikon (Si) dan aluminium (Al) merupakan bahan baku pembuatan material geopolimer, salah satunya adalah abu terbang yang merupakan abu sisa pembakaran batu bara (Hardjito dkk. Salah satu material yang kaya akan unsur tersebut adalah abu terbang, abu sisa pembakaran batu bara. Fly ash dapat digunakan sebagai bahan alternatif pengganti semen karena ukuran partikelnya yang hampir sama dengan semen.

Mortar geopolimer tahan terhadap asam sulfat, memiliki ketahanan abrasi yang baik dan penyusutan yang rendah, tahan terhadap reaksi krim alkali, tahan api dan dapat mengurangi polusi udara. Namun, mortar geopolimer memiliki kelemahan yaitu penggunaan material yang lebih banyak dibandingkan beton konvensional dan agak lebih rumit untuk diproduksi karena tidak ada perhitungan khusus untuk desain campuran (Andoyo et al, 2018).

## **2.7 Panel Mortar *Geopolymer***

Penggunaan beton geopolimer memberikan kemampuan kerja yang tahan lama, mengurangi emisi CO<sub>2</sub> sekitar 80%, tidak memerlukan perlakuan panas dan dapat dengan mudah digunakan oleh masyarakat umum (Duxson dkk., 2007).

Perkembangan terbaru dalam teknologi konstruksi adalah panel dinding berbahan dasar abu terbang (Hardjito *et al.*, 2005).

## 2.8 Material Penyusun Panel Mortar *Geopolymer*

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *fly ash*, aktivator berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), *superplasticizer*, dan boraks.

### 1. *Fly Ash*

Menurut SNI 03-6414-2002, *Fly ash* adalah sejenis pozzolan, bahan alam atau hasil buangan dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap yang tergolong bahan berbahaya dan beracun dengan kandungan silikat dan aluminat yang tinggi. *Fly ash* merupakan partikel berbentuk seperti bola dengan diameter 0,1-0,3  $\mu\text{m}$  yang terdiri dari senyawa 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.



**Gambar 11.** *Fly Ash*

Ketika *Fly ash* bereaksi secara kimia dengan natrium hidroksida, maka akan membentuk zat yang memiliki kemampuan mengikat karena kandungan air dan ukuran partikelnya yang halus (Hardjito, 2001). Partikel *fly ash* yang lebih halus mengisi rongga (spasi) di antara partikel agregat yang lebih halus di dalam semen. Namun demikian, abu terbang pada dasarnya bersifat rapuh dan penambahan serat diperlukan untuk meningkatkan fleksibilitas dan daya dukung struktur. Menurut ASTM C618-93, *fly ash* terbagi menjadi 3 kelas, yaitu kelas C (kadar  $\text{CaO} > 10\%$ ; kadar  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 50\%$ ; dihasilkan dari pembakaran lignite atau

subbitumen), kelas F (kadar  $\text{CaO} < 10\%$ ; kadar  $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70\%$ ; dihasilkan dari pembakaran batu bara antrasit atau aspal), Kelas N (pozzolan alami/pozolan terkalsinasi; dihasilkan dari pembakaran antrasit atau aspal), Kelas N (pozzolan alami/pozolan terkalsinasi, atau dihasilkan dari pembakaran tanah diatom, serpih buram dan batu tulis, tufa, dan abu vulkanik).

Dari ketiga jenis tersebut, abu terbang tipe C dan F memenuhi persyaratan tersebut, karena abu terbang yang dapat digunakan dalam campuran mortar geopolimer adalah abu terbang dengan kandungan  $\text{CaO}$  rendah dan kandungan Si dan Al lebih tinggi dari 50%.

## 2. Aktivator

Aktivator yang biasa digunakan untuk membuat *Geopolymer* adalah Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dan Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Alkali aktivator menghasilkan geopolimerisasi dan meningkatkan laju reaksi.

### a. Natrium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ )

Pereaksi basa natrium hidroksida merupakan basa kuat dan bertindak sebagai aktivator reaksi polimerisasi. Natrium hidroksida bereaksi dengan unsur Al dan Si pada abu layang menghasilkan ikatan polimer yang kuat (Dharma, 2012), rasio molar larutan  $\text{NaOH}$  8 M berdasarkan hasil penelitian Setiawati *et al.*, (2022).



**Gambar 12.** Natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ )

### b. Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

Natrium silikat terdiri dalam bentuk padat dan cair yang memiliki viskositas yang tinggi dan dapat mempengaruhi pengerjaan campuran geopolimer. Untuk campuran beton, digunakan bentuk larutan (Sutanto & Hartono, 2005). Selain

berfungsi meningkatkan kekuatan pasta, dapat juga mengikat material sampai terbentuk pasta padat. Secara mikroskopis, campuran *fly ash* dan natrium silikat membentuk ikatan yang sangat kuat, namun dengan banyak retakan (Andoyo *et al.*, 2018).



**Gambar 13.** Natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

### 3. *Superplasticizer*

*Superplasticizer* sebagai bahan tambah yang dapat meningkatkan *workability* campuran. *Superplasticizer* dapat mengurangi air sampai 30% sehingga dapat digunakan pada beton berkinerja tinggi untuk menghasilkan beton yang tidak kohesif.



**Gambar 14.** *Superplasticizer polycarboxylate (Plastiment Vz)*

Jenis-jenis *superplasticizer* yang biasa digunakan adalah *superplasticizer naphthalene*, *superplasticizer polycarboxylate*, dan *superplasticizer sodium glukonat*. Jenis yang paling efektif adalah *superplasticizer polycarboxylate (PCE)* mampu mengurangi kadar air sampai 40%.

### 4. Boraks

Boraks mengandung senyawa *Natrium Tetraborate Pentahydrate*

( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) digunakan sebagai aktivator atau salah satu senyawa tambahan dalam produksi larutan geopolimer. Boraks terurai menjadi natrium hidroksida dan asam borat ketika dilarutkan dalam air. Kombinasi boraks dan aktivator mempengaruhi kekuatan larutan geopolimer (Fletcher *et al.*, 2005).



**Gambar 15.** Boraks

## 2.9 Serat PVA

PVA (*Polyvinyl Alcohol*) adalah polimer sintetis yang dapat terurai secara hayati dengan fleksibilitas dan kekuatan tarik yang tinggi. Karakteristik PVA sifat-sifat seperti kemampuan untuk membentuk film transparan, kekuatan tinggi, keuletan, daya rekat yang baik, kelarutan dalam air yang baik dan kemudahan dalam pemrosesan, tidak beracun, biokompatibel (Ogur, 2005), PVA adalah bahan yang banyak digunakan sebagai perekat.

**Tabel 4.** Karakter fisik PVA

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

Serat polivinil alkohol (PVA) adalah jenis serat sintetis yang diproduksi dari bahan berkualitas tinggi; tingkat polimerisasi serat PVA sangat tinggi; PVA dicirikan dengan tidak beracun bagi tubuh manusia, kekuatan tarik yang tinggi,

tidak menimbulkan polusi, dan ketahanan yang sangat baik terhadap abrasi, asam, cairan, dan pelapukan. Penambahan serat PVA dalam pembuatan mortar geopolimer meningkatkan keuletan struktur karena panjang dan lebar retakan yang dihasilkan dapat dikurangi.



**Gambar 16.** *Polyvinyl Alcohol*

### **2.10 Wiremesh**

Wiremesh digunakan untuk memperkuat beton. Ini adalah tulangan yang terdiri dari kawat baja yang dilas dengan jarak antar kawat yang seragam (Zuhuri & Kopa, 2021). Jenis wire mesh yang paling umum adalah kawat dengan jarak antar kawat yang sempit. Menurut ACI 549.1R-93, persyaratan yang harus dipenuhi oleh kawat anyaman untuk tulangan adalah bersih dan bebas dari kotoran, karat yang lepas, lapisan berwarna, minyak, atau zat serupa. Kekuatan desain wire mesh anyam tidak boleh melebihi 100.000 psi (690 MPa).



**Gambar 17.** *Wiremesh*

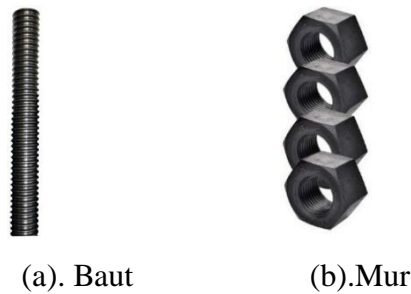
Sebuah studi tentang perkuatan wiremesh oleh Putri *et al.* (2020) pada panel dinding geopolimer yang diperkuat dengan wire mesh melaporkan bahwa penambahan wire mesh dapat meningkatkan kuat lentur panel sebesar 4,28 MPa.

Studi lain tentang kuat geser panel dinding yang diperkuat dengan wire mesh oleh Purbotunggal & Muhammad Ujjianto (2016) menyimpulkan bahwa penambahan wire mesh dapat meningkatkan kuat geser panel yang diperkuat sebesar 1353,93 kN/m<sup>2</sup>.

### **2.11 Metode Sambungan Baut**

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 (Ameryan *et al.*, 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.





**Gambar 18.** Baut dan mur

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 (Iwase *et al.*, 2005). Salah satunya menggunakan konektor geser yang dibaut. (Aji & Ali, 1998) 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 18(a), menunjukkan gambar baut dan Gambar 18(b), gambar mur.