

## Pengaruh Variasi Jarak Baut Terhadap Perilaku Geser Balok Beton Bertulang yang diperkuat dengan Panel Mortar Geopolimer

Fakhruddin<sup>1</sup>, Rita Irmawaty<sup>2</sup>, Rudy Djameluddin<sup>3</sup>, Radix Dwi Wardhana<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup>Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Email: [fakhrud.civil05@gmail.com](mailto:fakhrud.civil05@gmail.com)<sup>1</sup>, [Rita\\_irmaway@yahoo.co.id](mailto:Rita_irmaway@yahoo.co.id)<sup>2</sup>,

[rudy0011@gmail.com](mailto:rudy0011@gmail.com)<sup>3</sup>, [Radixdwiwardhana01@gmail.com](mailto:Radixdwiwardhana01@gmail.com)<sup>4</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v13i2.873>

(Received: 11 January 2023 / Revised: 04 July 2023 / Accepted: 02 August 2023)

### Abstrak

Penelitian ini menyajikan perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer dan serat *Polyvinyl Alcohol* (PVA). Benda uji terdiri atas 3 buah balok dengan dimensi 150x300 mm dan panjang 2300 mm. Panel mortar geopolimer dipasang pada bentang geser balok beton bertulang dengan variasi jarak antar baut 200 mm (GM-200) dan 300 mm (GM-300). Hasil penelitian dibandingkan berdasarkan pendekatan beban-lendutan, beban maksimum, perilaku beban regangan tulangan dan beton, dan pola retak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas geser balok meningkat sebesar 34.98% (GM-W-200) dan 28.81% (GM-W-300) dibandingkan dengan balok kontrol (CB). Selain itu, variasi jarak baut juga berpengaruh signifikan terhadap pola kegagalan balok. Balok dengan jarak antar baut 200 mm menunjukkan pola kegagalan lentur dan daktail, sementara balok dengan jarak antar baut 300 mm menunjukkan pola kegagalan geser yang getas.

Kata kunci: *beton bertulang, jarak antar baut, mortar geopolimer, perkuatan*

### Abstract

This study presents the behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with geopolymer mortar panels and *Polyvinyl Alcohol* (PVA) fibers. The specimens consist of three RC beams with dimensions of 150x300 mm and length of 2300 mm. Geopolymer mortar panels are installed on shear spans of RC beams with variations in the distance between the bolts of 200 mm (GM-W-200) and 300 mm (GM-W-300). The study results were compared with the control beam (CB) without strengthening. The shear behavior of the beams was discussed based on the load-deflection behavior, the maximum load, the reinforcement and concrete stress-strain behavior, and the crack pattern. The results indicated that the shear capacity of the strengthened beams increased by 34.98% (GM-W-200) and 28.81% (GM-W-300) compared to the control beam (CB). In addition, differences in bolt spacing had a significant influence on beam failure patterns. Beams with a bolt spacing of 200 mm exhibited ductile bending failure, whereas beams with a bolt spacing of 300 mm showed brittle shear failure.

Keywords: *bolt spacing, mortar geopolymer, reinforced concrete, reinforcement*

## 1. Latar Belakang

Perbaikan dan perkuatan elemen-elemen struktur diperlukan apabila terjadi penurunan mutu pada suatu struktur bangunan yang berakibat tidak terpenuhinya lagi persyaratan-persyaratan yang bersifat teknik (Triwiyono and Wikana, 2000) Perkuatan (*strengthening*) adalah tindakan perubahan atau penyesuaian suatu struktur, mungkin sebelum terjadi kerusakan, dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan atau kapasitas bangunan untuk menahan beban yang lebih besar akibat perubahan fungsi dan stabilitas bangunan (Khoeri, 2020).

Mekanisme perkuatan merupakan salah satu upaya penanggulangan yang relevan untuk meningkatkan kinerja struktur beton bertulang eksisting agar memenuhi persyaratan standar. Beberapa metode perkuatan yang biasanya digunakan, seperti metode *bonded external steel-plate*, yang memberikan peningkatan struktural yang signifikan, namun memiliki kelemahan terhadap ketahanan dari korosi dan api. Selain itu, metode perkuatan menggunakan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) yang dicirikan dengan kekuatan yang tinggi terhadap rasio berat, pengaplikasian yang mudah, tahan terhadap korosi dan meminimalkan perubahan geometri, namun pengaplikasian FRP tidak efektif pada lingkungan yang lembab (Firmo, Correia and Bisby, 2015), maka dari itu, diusulkan sebuah sistem perkuatan baru, 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, 2008), 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 CO<sub>2</sub> yang dipancarkan saat produksi menurun secara signifikan dari pada semen portland biasa (OPC). Selain itu, *fly ash* memiliki sifat yang serupa dengan semen (Hassan, Arif and Shariq, 2019). Menurut Fernández-Jiménez (Fernández-Jiménez *et al.*, 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 (Nath and 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 (He *et al.*, 2010), baja (Ahmed, Maalej and Paramasivam, 2007), kaca (Nematollahi *et al.*, 2014), PVA (Ekaputri *et al.*, 2021); (Al-Majidi *et al.*, 2019); (Furqan and Irmawaty, 2022) (Irmawaty, Fakhruddin and Ekaputri, 2022) (Fakhruddin, Irmawaty and Putri, 2023) kapas (Alomayri, Shaikh and Low, 2013), dan serat alami (Alzeer and MacKenzie, 2013). Salah satu serat yang menjadi perhatian beberapa tahun terakhir yaitu serat and *Polyvinyl Alcohol* (PVA) karena memiliki kuat tarik yang tinggi, memiliki harga yang relatif lebih murah, memiliki modulus younh yang mirip dengan beton, dan tahan terhadap asam dan alkalinitas.

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. Penggunaan baut dapat memberikan kapasitas geser pada sambungan antara beton dan panel mortar geopolimer. Perkuatan tersebut diharapkan dapat meningkatkan kinerja struktural, termasuk kekuatan, 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 tentang pengaruh variasi jarak antar baut terhadap perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku geser balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer dengan variasi jarak antar baut. Hasil penelitian didiskusikan berdasarkan hubungan beban-lendutan, kapasitas geser maksimum, hubungan beban-regangan dan pola retak.

## 2. Metode Penelitian

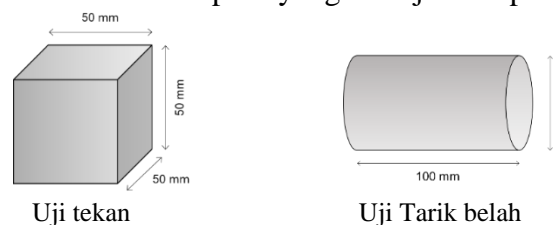
Penelitian ini termasuk dalam penelitian eksperimental. Secara umum, penelitian ini terdiri atas dua tahap, yaitu pabrikasi panel mortar geopolimer dan pabrikasi balok beton bertulang. Tahapan pembuatan panel mortar geopolimer terdiri atas pembuatan cetakan, pemasangan wiremesh, pencampuran mortar geopolimer, penuangan mortar geopolimer ke dalam cetakan dan proses curing

### 2.1 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada pengujian mortar geopolimer terdiri atas concrete mixer, timbangan, mould kubus ukuran 50 x 50 x 50 mm, mould silinder ukuran 50 x 100 mm dan *Universal Testing Machine* (UTM). Sementara bahan yang digunakan pada campuran mortar geopolimer adalah *fly ash*, pasir alam, NaOH (Natrium Hidroksida),  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (Natrium Silikat), *superplasticizer* (Plastiment Vz), boraks dan *PVA fiber*.

### 2.2 Pengujian Karakteristik Mekanis Mortar

Pengujian karakteristik mekanis mortar terdiri atas pengujian kuat tekan yang berdasarkan pada ASTM C39 (ASTM C39/C39 M-01, 2001) dan pengujian kuat tarik belah yang berdasarkan pada ASTM C496 (ASTM C496, 2008). Sampel pengujian karakteristik diambil pada *batch* yang sama saat pengecoran panel mortar geopolimer. Sampel yang digunakan adalah kubus ukuran 50 mm x 50 mm dan silinder ukuran 50 mm x 100 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Dimensi benda uji

### 2.3 Pengujian Karakteristik Mekanis Beton dan Tulangan

Pengujian karakteristik mekanis beton yang dilakukan adalah pengujian kuat tekan. Sampel pengujian karakteristik diambil pada *batch* yang sama pada saat

pengecoran sampel balok. Pengujian karakteristik mekanis beton dilakukan pada umur 28 hari atau pada hari yang sama pengujian lentur balok. Sampel yang digunakan adalah kubus ukuran 150 mm x 300 mm sebanyak 3 buah. Pengujian kuat tekan beton mengacu pada standar ASTM C39-94 (*Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*) yang dihitung berdasarkan Persamaan 1.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

$f'_c$  = kuat tekan beton (MPa)

P = beban (N)

A = luas bidang tekan silinder (mm<sup>2</sup>)

Karakteristik mekanis tulangan ditentukan berdasarkan hasil pengujian tarik. Tulangan baja untuk konstruksi beton bertulang diuji karakteristik mekanisnya berdasarkan SNI 2052:2017 dan ASTM E8/E8M-09. Sampel yang digunakan adalah baja tulangan polos diameter 8 mm (Ø8) dan baja tulangan ulir diameter 16 mm (D16) masing-masing sebanyak 3 buah. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Data yang diperoleh berupa tegangan tarik yang dihitung berdasarkan Persamaan 2.

$$f_s = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Keterangan:

$f_s$  = tegangan tarik (MPa)

P = beban (N)

A = luas tulangan (mm<sup>2</sup>)

## 2.4 Pengujian Geser Balok

Alat yang digunakan pada pengujian geser balok yaitu alat ukur LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*) untuk mengukur lendutan yang terjadi ditengah bentang balok neton bertulang, *strain gauge* tipe FLA-2-11 (gauge factor 2,12±1%) untuk mengukur regangan baja tulangan dan *strain gauge* tipe PL-60-11 (gauge factor 2,09±1%) untuk mengukur regangan beton, *Load Cell* dan *Data Logger* TDS-530. Untuk pengujian kuat tekan beton menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM).

## 2.5 Benda Uji

### 2.5.1 Panel mortar geopolimer

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* dan PVA fiber. Fly ash diperoleh dari PLTU Bosowa Jeneponto, Sulawesi Selatan. Tabel 1 memperlihatkan komposisi campuran mortar *geopolimer*. Komposisi campuran berdasarkan hasil pengujian trial mix yang merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Ekaputri *et al.*, 2021.

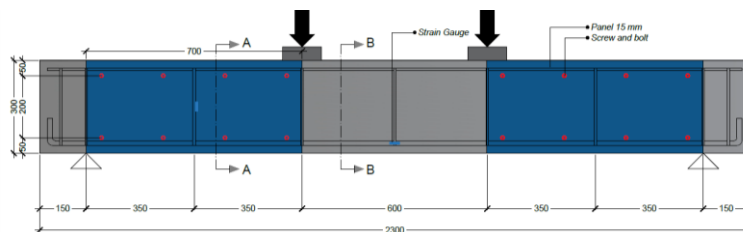
Tabel 1 Komposisi campuran mortar geopolimer

Kode	kg per m <sup>3</sup>							PVA (%)
	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Boraks	Pasir	Semen	<i>Fly Ash</i>	<i>Plasticizer</i>	
GM-0.6	156	234	10	780	-	390	7.8	0.6

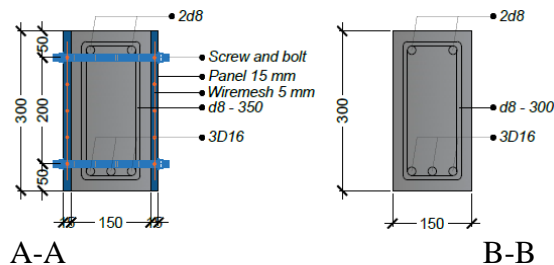
GM : mortar Geopolimer 0.6 : kandungan PVA fiber

### 2.5.2 Balok Beton Bertulang

Jumlah benda uji balok dalam penelitian ini adalah 3 buah yang terdiri dari balok kontrol tanpa perkuatan (CB), balok yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer dan serat PVA dengan menggunakan angkur baut dengan jarak antar baut 200 mm dan 300 mm (GM-W-200 dan GM-W-300) masing-masing sebanyak 1 buah. Dimensi balok adalah 150 mm x 300 mm dengan panjang balok sebesar 2300 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



a. Arah memanjang balok



b. Potongan melintang

Gambar 2 Dimensi benda uji balok

Benda uji dibuat menggunakan beton *ready mix* dengan kuat tekan desain sebesar 25 MPa. Mix desain dari beton ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Mix desain beton normal per m<sup>3</sup>

Semen Portland	Pasir	Kerikil 1-2	Kerikil 2-3	Air	Additive
420 kg	950 kg	780 kg	175 kg	175 liter	1.47 liter

## 2.6 Pembuatan Benda Uji

### 2.6.1 Pembuatan panel mortar geopolimer

Pada pembuatan panel dilakukan fabrikasi bekisting panel dan pemasangan pipa PVC sesuai dengan jarak antar baut. Selanjutnya dilakukan persiapan material mortar geopolimer. Pada saat pencampuran *fly ash* dan boraks dicampurkan ke dalam mixer terlebih dahulu sebelum mixer dinyalakan.



Gambar 3 Proses pembuatan panel mortar geopolimer

Masukkan NaOH yang telah dicampur dengan *superplasticizer* selama kurang lebih dua menit. Kemudian masukkan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan aduk selama dua menit dan dua menit kemudian masukkan secara perlahan pasir diaduk selama dua menit. Masukkan serat PVA perlahan agar tidak terjadi penggumpalan dan aduk selama dua menit. Setelah itu, tuangkan campuran dalam cetakan yang telah dipasangkan *wiremesh*. Gambar 3 menunjukkan proses pembuatan panel mortar geopolimer.

### 2.6.2 Pembuatan balok beton bertulang

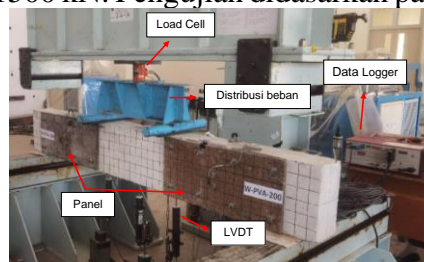
Pembuatan diawali dengan fabrikasi tulangan dan bekisting kemudian dilakukan pemasangan *strain gauge* baja dan diinstalasi pada bekisting. Setelah siap dilakukan pengecoran dengan beton *ready mix*. Pada tahap ini dilakukan pengambilan sampel silinder berukuran 150 mm x 300 mm untuk pengujian kuat tekan beton. Setelah itu, dilakukan perawatan dengan metode *moist curing* hingga mencapai umur 28 hari. Setelah 28 hari dilakukan pemasangan panel pada balok beton bertulang dengan jarak antar baut 200 mm dan 300 mm sebelum dilakukan pengujian. Gambar 4 menunjukkan proses pemasangan panel mortar geopolimer.



Gambar 4 Proses pemasangan panel mortar geopolimer

### 2.7 Setup Alat Pegujian

Gambar 5 menunjukkan setup pengujian lentur balok beton bertulang. Benda uji akan dibebani dengan beban dua titik secara monotonik menggunakan alat uji statik dengan kapasitas 1500 kN. Pengujian didasarkan pada SNI 4431:2011, 2011).



Gambar 5 Sketsa Setup Pengujian

Pembebanan menggunakan kontrol lendutan dengan kecepatan pembebanan 0.2 mm/detik. Instrumentasi yang digunakan adalah *strain gauge* untuk mengukur regangan pada beton dan baja, *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) untuk mengukur lendutan benda uji, *load cell* kapasitas 200 ton untuk membaca beban yang terjadi, serta data logger untuk menyimpan semua data-data yang diukur oleh instrumen, selain itu juga dipasang beberapa *strain gauge* pada tulangan tarik, tulangan geser dan beton untuk mengukur besarnya regangan yang terjadi pada tulangan dan beton selama pengujian. Hasil pembacaan *strain gauge* juga digunakan untuk mendiskusikan mode kegagalan pada balok beton bertulang.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Pengujian Karakteristik Mekanis Mortar Geopolimer

Pengujian kuat tekan mortar menggunakan benda uji kubus dengan dimensi 50 mmx50 mmx 50 mm. Pengujian kuat tarik belah menggunakan benda uji silinder dengan dimensi 50 mm x 100 mm. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah mortar geopolimer pada umur 28 hari ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3 Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer pada umur 28 hari

Kode	Berat (gram)	Kuat tekan (MPa)
GM-1	261,0	20,8
GM-2	260,9	20,4
GM-3	268,5	24,4
Rata-rata	263,5	21,5

Tabel 4 Hasil pengujian kuat tarik belah mortar geopolimer pada umur 28 hari

Kode	Berat (gram)	Kuat tarik belah (MPa)
GM-1	566,2	4,2
GM-2	527,4	4,9
GM-3	581,4	4,7
Rata-rata	558,3	4,6

Berdasarkan Tabel 3 dan 4, diperoleh nilai kuat rata-rata mortar geopolimer pada umur 28 hari adalah sebesar 21.5 MPa dan kuat tarik belah rata-rata sebesar 4.6 MPa. Pengujian ini dilakukan untuk menganalisis nilai ketahanan geser dari mortar geopolimer pada umur 28 hari.

#### 3.2 Karakteristik Mekanis Beton dan Tulangan

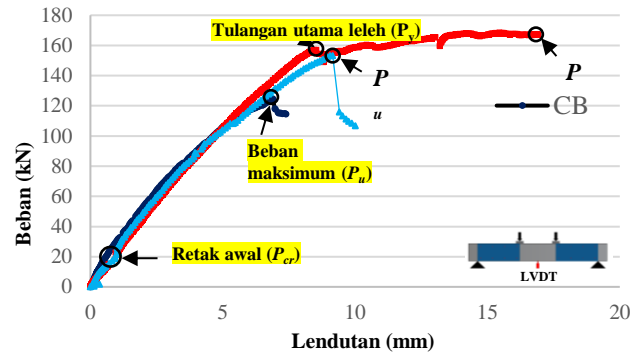
Pengujian mekanis beton dan tulangan dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian kuat tekan beton dilakukan menggunakan benda uji silinder dengan dimensi 150 mm x 300 mm. Hasil rata-rata pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari didapatkan sebesar 21.1 MPa. Hasil pengujian mekanis baja didapatkan rata-rata untuk tulangan sengkang Ø8 sebesar 336.75 MPa dan tulangan D16 sebesar 384.82 MPa. Hasil pengujian mekanis baja menunjukkan bahwa tulangan Ø8 dan D16 masing-masing termasuk ke dalam kelas BjTP 280 dan BJTS 280.

#### 3.3 Pengujian Geser Balok

##### 3.3.1 Hubungan beban lendutan

Gambar 6 menunjukkan hubungan beban-lendutan balok CB, GM-W-200 dan GM-W-300 pada tengah bentang. Tabel 5 merekapitulasi hasil pengujian. Grafik hubungan beban lendutan diperoleh dari hasil pengujian geser balok beton bertulang, di mana beban diperoleh dari *load cell* dan lendutan diperoleh dari LVDT di tengah bentang. Secara umum, hubungan beban lendutan dapat diidealisasikan menjadi bentuk trilinear yang terdiri dari tiga fase yaitu fase pertama, beton masih dalam kondisi elastis (belum retak). Fase kedua adalah fase di mana beton mulai

mengalamiretak dan fase ketiga yaitu fase plastis di mana tulangan baja leleh hingga mencapai beban maksimum.



Gambar 6 Hubungan beban-lendutan variasi

Tabel 5 Rekapitulasi hubungan beban-lendutan

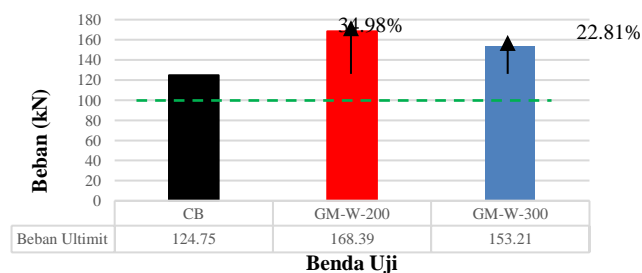
Kode	Beban (kN)				Lendutan (mm)			
	$P_{cr}$	$P_{y(Geser)}$	$P_{y(Tarik)}$	$P_u$	$\delta_{cr}$	$\delta_{y(Geser)}$	$\delta_{y(Tarik)}$	$\delta_u$
CB	10,06	-	-	124.75	0,27	-	-	6,89
GM-W-200	11,06	166,30	156,27	168.40	0,52	8,54	8,38	15,46
GM-W-300	12,73	-	153.14	153.21	2.55	-	9.06	9,16

$P_{cr}$  ( $P_{crack}$ ): beban saat retak awal,  $\delta_{cr}$ : lendutan saat retak awal,  $P_y$  ( $P_{yield}$ ): beban saat tulangan leleh,  $\delta_y$ : lendutan saat tulangan leleh,  $P_u$  ( $P_{ultimate}$ ): beban maksimum,  $\delta_u$ : lendutan saat beban maksimum)

Berdasarkan Gambar 6, kekakuan dari ketiga benda uji memiliki perilaku yang sama pada saat terjadi retak awal namun setelah kondisi retak awal sampai pada beban tertentu, balok CB mengalami penurunan kekakuan hingga balok hancur. Pada balok dengan penambahan panel perkuatan, beban masih mengalami peningkatan hingga tulangan utama leleh. Balok GM-W-300 memperlihatkan kekakuan yang lebih kecil dibandingkan dengan balok GM-W-200. Hal ini menunjukkan ikatan yang lebih baik antara balok dan panel perkuatan dengan jarak antar baut yang lebih rapat. Selain itu, penambahan serat PVA pada mortar geopolimer juga berpengaruh pada peningkatan kapasitas lentur, kekakuan, dan mode kegagalan (Yunsheng *et al.*, 2008).

### 3.3.2 Beban maksimum

Beban maksimum balok CB, GM-W-200 dan GM-W-300 masing-masing sebesar 124.75 kN, 168.40 kN dan 153.21 kN.



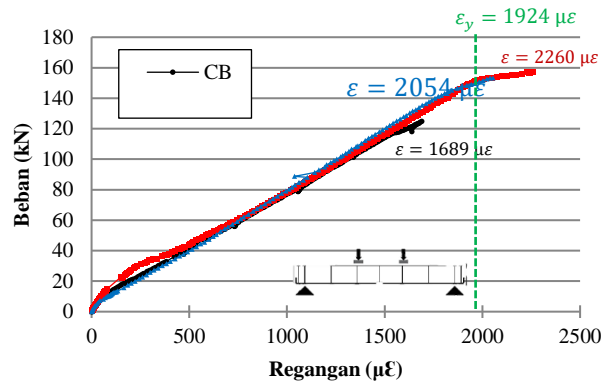
Gambar 7 Beban Maksimum



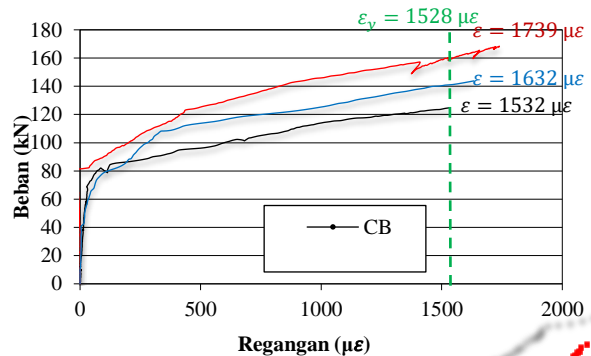
Beban maksimum balok GM-W-200 dan GM-W-300 mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan balok CB yaitu sebesar 34.98% dan 22.81% dibandingkan dengan balok CB.

### 3.3.3 Hubungan beban regangan tulangan

Grafik hubungan beban dan regangan tulangan untuk semua benda uji bertujuan untuk mengevaluasi beban dan regangan baik pada tulangan tarik maupun tulangan geser, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Regangan pada tulangan tarik dan geser diperoleh dari hasil pembacaan *strain gauge*.



Gambar 8 Beban Regangan Tulangan Tarik



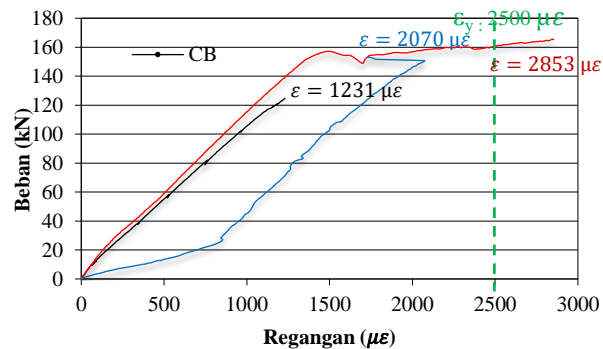
Gambar 9 Beban Regangan Tulangan Geser

Berdasarkan Gambar 8, regangan yang terjadi pada tulangan tarik pada balok CB, GM-W-200 dan GM-W-300 adalah masing-masing sebesar 1689  $\mu\epsilon$ , 2260  $\mu\epsilon$  dan 2054  $\mu\epsilon$ . Sementara berdasarkan hasil pengujian karakteristik tulangan, diperoleh regangan leleh sebesar 1924  $\mu\epsilon$ . Hal ini menunjukkan bahwa tulangan tarik pada balok CB belum mengalami leleh, sementara pada balok perkuatan telah mengalami leleh.

Berdasarkan grafik hubungan beban-regangan tulangan geser yang ditunjukkan pada Gambar 10, regangan yang terjadi pada tulangan geser pada balok CB, GM-W-200 dan GM-W-300 adalah masing-masing sebesar 1532  $\mu\epsilon$ , 1739  $\mu\epsilon$  dan 1632  $\mu\epsilon$ . Sementara berdasarkan hasil pengujian karakteristik tulangan, diperoleh regangan leleh sebesar 1528  $\mu\epsilon$ . Hal ini menunjukkan bahwa tulangan geser pada balok CB telah mengalami leleh, sementara pada balok perkuatan belum mengalami leleh.

### 3.3.4 Hubungan beban regangan beton

Untuk mengevaluasi beban-regangan pada beton maka dibuat grafik hubungan beban-regangan beton untuk semua benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Regangan pada beton diperoleh dari hasil pembacaan *strain gauge* yang dipasang pada sisi tekan terluar balok.



Gambar 10 Beban Regangan Beton

Balok CB, balok GM-W-200 dan GM-W-300 mencapai regangan maksimum masing-masing 1231  $\mu\epsilon$ , 2853  $\mu\epsilon$ , 2073  $\mu\epsilon$ . Hal ini menunjukkan bahwa regangan beton pada balok CB dan GM-W-300 belum mencapai regangan ultimitnya yaitu sebesar 2500  $\mu\epsilon$ . Kehancuran pada sisi tekan beton juga dapat dilihat pada nilai regangan beton di mana balok dengan nilai mencapai nilai regangan ultimit beton mengalami kehancuran pada sisi tekannya. Hal ini terlihat pada balok GM-W-200.

### 3.4 Pola Retak dan Mode Kegagalan

#### 3.4.1 Balok kontrol (CB)

Gambar 11 menunjukkan pola retak balok kontrol (CB). Balok kontrol (CB) mengalami retak awal yang merupakan retak lentur pada beban 37.3 kN. Retak tersebut terjadi pada sisi tarik kiri bentang dan bertambah panjang. Setelah retak awal muncul, retak-retak lentur lain muncul pada daerah tarik dan geser. Retak awal daerah geser terjadi saat beban sebesar 56 kN. Retak ini merupakan perpanjangan dari retak lentur yang sebelumnya muncul.



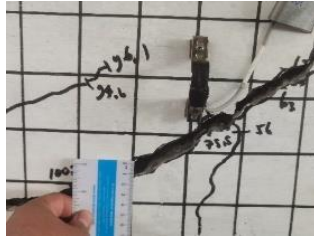
a. Sisi kiri



b. Sisi kanan

Gambar 11 Pola Retak Balok Kontrol (CB)

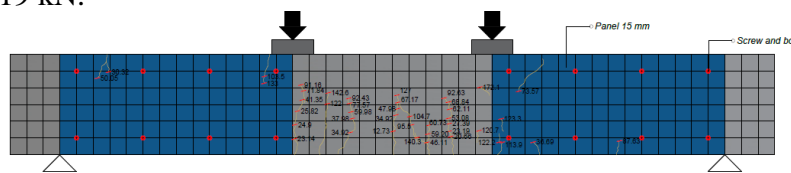
Pada saat beban puncak, muncul retak utama berupa retak diagonal yang terus melebar dari bawah daerah geser menuju titik pembebanan. Lebar retak diagonal adalah 15 mm (Gambar 12), di mana lebar retak ini telah melebihi lebar retak maksimum yang diizinkan yaitu sebesar 0,41 mm. Retak diagonal ini menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan geser (*Shear Failure*).



Gambar 12 Lebar retak diagonal

### 3.4.2 Balok GM-W-200

Gambar 13 menunjukkan pola retak yang terjadi pada benda uji GM-W-200 di mana retak awal yang merupakan retak lentur pada balok GM-W-200 terjadi pada beban 25.19 kN.



a. Sketsa pola retak di sepanjang bentang balok



b. Sisi kiri balok



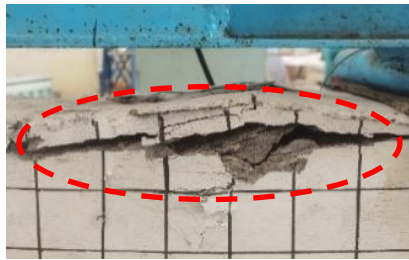
c. Sisi kanan balok

Gambar 13 Pola Retak Balok GM-W-200

Berdasarkan pengamatan pada benda uji, retak awal terjadi pada sisi tarik tengah bentang. Setelah retak awal, retak lentur lainnya muncul pada daerah tarik di sisi kanan dan kiri bentang. Retak-retak lentur ini kemudian memanjang ke arah titik pembebanan (daerah tekan), dan beberapa diantaranya menjadi retak geser.

Setelah mencapai beban maksimum, beton mengalami kehancuran pada sisi tekan seperti yang terlihat pada Gambar 13. Hal ini juga terlihat pada grafik

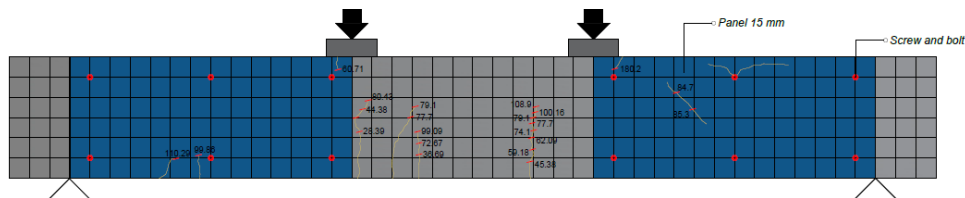
hubungan beban – regangan beton (Gambar 10), di mana regangan beton balok GM-W-200 pada daerah tekan mencapai nilai  $2500 \mu\epsilon$ .



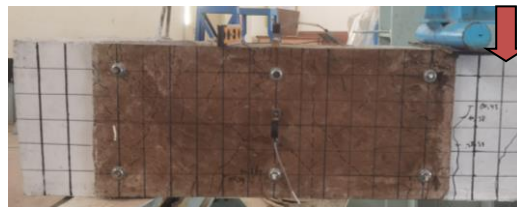
Gambar 14 *Concrete Crushing* pada balok GM-W-200

### 3.4.3 Balok GM-W-300

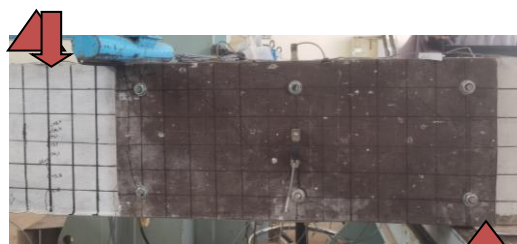
Gambar 15 menunjukkan pola retak yang terjadi pada benda uji GM-W-300 di mana retak awal yang merupakan retak lentur pada balok GM-W-300 terjadi pada beban 28.39 kN



a. Sketsa pola retak di sepanjang bentang balok



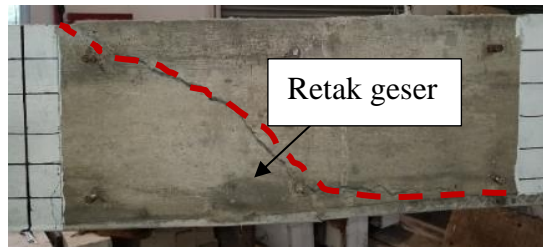
b. Sisi kiri balok



c. Sisi kanan balok

Gambar 15 Pola Retak Balok GM-W-300

Berdasarkan pengamatan pada benda uji, retak awal terjadi pada sisi tarik tengah bentang. Setelah retak awal, retak-retak lentur lainnya muncul kemudian menjalar ke arah titik pembebanan. Setelah mencapai beban maksimum, beton mengalami retak diagonal utama seperti yang terlihat pada Gambar 16. Hal ini juga terlihat pada grafik hubungan beban – regangan beton (Gambar 10), di mana regangan beton balok GM-W-300 pada daerah tekan belum mencapai nilai  $2500 \mu\epsilon$ .



Gambar 16 Retak diagonal utama pada balok GM-W-300

Berdasarkan hasil pengamatan pada pola retak dan model kegagalan pada balok CB, GM-W-200 dan GM-W-300 dapat dilihat bahwa keduanya memiliki kesamaan antara lain tipe retak awal dan jumlah retak pada masing-masing benda uji. Namun, kedua variasi balok mengalami keruntuhan yang berbeda serta mode kegagalan yang berbeda di mana balok GM-W-200 mengalami kegagalan lentur sedangkan GM-W-300 mengalami kegagalan geser.

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Penambahan panel perkuatan dengan material mortar geopolimer mampu meningkatkan kapasitas geser balok beton bertulang, masing-masing sebesar 34,98% dan 22,81% untuk benda uji GM-W-200 dan GM-W-300 terhadap balok kontrol (CB) dalam bentuk peningkatan beban maksimum dan perubahan pola kegagalan dari kegagalan geser (*shear failure*) menjadi kegagalan lentur (*flexural failure*). Pola retak pada balok GM-W-200 dan GM-W-300 memperlihatkan kemiripan pada saat retak awal. Namun menunjukkan mode kegagalan yang berbeda di mana balok GM-W-200 menunjukkan pola kegagalan lentur sedangkan balok CB dan GM-W-300 menunjukkan pola kegagalan geser.

##### 4.1 Saran

Disarankan untuk memperhatikan proses perawatan (*curing*) pada panel mortar geopolimer agar tidak terjadi retak berlebih. Selain itu, juga disarankan melakukan penelitian lebih lanjut mengenai perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan panel mortar geopolimer.

#### Daftar Kepustakaan

- Ahmed, S.F.U., Maalej, M. and Paramasivam, P. (2007) 'Flexural responses of hybrid steel-polyethylene fiber reinforced cement composites containing high volume fly ash', *Construction and Building Materials*, 21(5), pp. 1088–1097. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.01.002>.
- Al-Majidi, M.H. *et al.* (2019) 'Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced geopolimer concrete under accelerated corrosion', *Structures*, 19, pp. 394–410. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.005>.

- Alomayri, T., Shaikh, F.U.A. and Low, I.M. (2013) ‘Thermal and mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites’, *Journal of Materials Science*, 48(19), pp. 6746–6752. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7479-2>.
- Alzeer, M. and MacKenzie, K. (2013) ‘Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax)’, *Applied Clay Science*, 75–76, pp. 148–152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.010>.
- ASTM C39/C39 M-01 (2001) ‘Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens’, *Annual Book of ASTM Standards* [Preprint].
- ASTM C496 (2008) ‘Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens’, *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 545–545–3.
- Davidovits, J. (2008) *Geopolymer CHEMistry and Applications, 5th edition, J. Davidovits.–Saint-Quentin, France*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/265076752>.
- Duxson, P. *et al.* (2007) ‘The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”’, *Cement and Concrete Research*, 37(12), pp. 1590–1597. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>.
- Ekaputri, J.J. *et al.* (2021) ‘Improving Geopolymer Characteristics with Addition of Poly-Vinyl Alcohol (PVA) Fibers’, *Civil Engineering Dimension*, 23(1), pp. 28–34. Available at: <https://doi.org/10.9744/ced.23.1.28-34>.
- Fakhrudin, F., Irmawaty, R. and Putri, J.J.E. (2023) ‘External Shear Strengthening of RC Beams with Anchored Geopolymer Fiber Mortar Panel: An Experimental Study’, *Materials Science Forum*, 1091, pp. 93–100. Available at: <https://doi.org/10.4028/p-1tdbui>.
- Fernández-Jiménez, A. *et al.* (2008) ‘Alkaline activation of metakaolin-fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements’, *Microporous and Mesoporous Materials*, 108(1–3), pp. 41–49. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.03.024>.
- Firmo, J.P., Correia, J.R. and Bisby, L.A. (2015) ‘Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review’, *Composites Part B: Engineering*, 80, pp. 198–216. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.045>.
- Furqan, N. and Irmawaty, R. (2022) ‘IJEScA Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Fly Ash Based Geopolymer Strengthening’, *International Journal of Engineering and Science Applications* [Preprint].
- Hassan, A., Arif, M. and Shariq, M. (2019) ‘Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure’, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, pp. 704–728. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051>.
- He, P. *et al.* (2010) ‘Effects of high-temperature heat treatment on the mechanical properties of unidirectional carbon fiber reinforced geopolymer composites’, *Ceramics International*, 36(4), pp. 1447–1453. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.02.012>.

- Irmawaty, R., Fakhruddin and Ekaputri, J.J. (2022) ‘Experimental and analytical study for shear strengthening of reinforced-concrete beams using a prefabricated geopolymer–mortar panel’, *Case Studies in Construction Materials*, 17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01568>.
- Khoeri, H. (2020) ‘Pemilihan Metode Perbaikan Dan Perkuatan Struktur Akibat Gempa (Studi Kasus Pada Bank Sulteng Palu)’, *Jurnal Konstruksia*, 12(1), pp. 93–104.
- Nath, P. and Sarker, P.K. (2017) ‘Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature’, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(1). Available at: <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0893-6>.
- Nematollahi, B. *et al.* (2014) ‘Properties of fresh and hardened glass fiber reinforced fly ash based geopolymer concrete’, in *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, pp. 629–633. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.594-595.629>.
- SNI 2052:2017 (2017) ‘SNI 2052:2017 Baja tulangan beton’, *Badan Standarisasi Nasional* [Preprint]. Available at: [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id).
- SNI 4431:2011 (2011) ‘SNI 4431:2011 Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan’, *Badan Standarisasi Nasional* [Preprint]. Available at: [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id).
- Triwiyono, A. and Wikana, I. (2000) *Kuat Geser Kolom Beton Bertulang Penampang Lingkaran yang Diperbaiki dengan Metode Concrete Jacketing*. Universitas Gadjah Mada.