

PERKUATAN LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN MORTAR GEOPOLIMER

Rita Irmawaty¹, Fakhruddin² dan Andrew Oktaviyanto Gosal³

^{1,2,3}*Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin,
Jl. Poros Malino KM. 06 Bontomarannu, Gowa,
Sulawesi Selatan
Email: Rita_irmaway@yahoo.co.id*

ABSTRAK

Kerusakan balok beton bertulang seringkali dijumpai dalam berbagai jenis infrastruktur, baik pada struktur baru maupun pada struktur lama. Perkuatan struktur biasanya dilakukan sebagai upaya untuk pencegahan sebelum struktur mengalami kegagalan, sedangkan perbaikan struktur diterapkan sebagai upaya untuk mengembalikan fungsi struktur seperti semula setelah mengalami penurunan kekuatan. Pengaplikasian mortar *geopolymer* berbahan *fly ash* kelas C sebagai material perkuatan struktur belum banyak diteliti dan akan didiskusikan dalam tulisan ini. Studi ini menyajikan perilaku lentur dan mode kegagalan balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer pada daerah tarikannya. Enam balok beton bertulang dengan dimensi 150 mm x 200 mm x 3300 mm, terdiri dari balok konvensional (BK), balok yang diperkuat dengan mortar geopolimer dengan dan tanpa penambahan serat PVA (BGP dan BGPF). Masing-masing variasi terdiri atas dua balok uji. Area perkuatan balok pada daerah tarik sepanjang 2700 mm dan tebal 50 mm. Mortar *geopolymer* terbuat dari *fly ash* kelas C, pasir dan aktivator yang terdiri atas *Sodium Hydroxide* dan *Sodium Silicate*. Hasil uji uji lentur menunjukkan bahwa kemampuan balok dalam memikul beban setelah diperkuat dengan mortar *geopolymer* (BGP) hampir sama dengan BK. Namun dengan penambahan serat PVA pada mortar *geopolymer* (BGPF), kapasitas balok dalam memikul beban meningkat 9,02% terhadap BK dan 16,14% terhadap BGP. Semua balok mengalami kegagalan lentur. Pada daerah sambungan, balok BGP mengalami kegagalan delaminasi, sedangkan balok BGPF mengalami kegagalan *debonding*.

Kata kunci: *fly ash*, *geopolymer*, perkuatan struktur

1. PENDAHULUAN

Balok beton bertulang konvensional pada umumnya terdiri dari campuran kerikil, pasir, semen dan air serta tulangan baja. Beton bertujuan untuk menahan gaya tekan sedangkan tulangan baja untuk menahan gaya tarik dan geser. Distribusi tegangan akibat beban lentur yang diterima balok, akan menyebabkan serat bagian atas balok tertekan dan serat bagian bawah balok tertarik. Pada saat beban ditingkatkan, balok menahan regangan dan defleksi tambahan yang menyebabkan retak-retak lentur sepanjang daerah tarik dari balok. Penambahan beban secara terus menerus akan mengakibatkan kegagalan atau kerusakan pada elemen struktural. Berbagai kerusakan pada struktur balok seperti retak, segregasi dan *spalling* sering dijumpai baik pada struktur baru maupun struktur lama. Perkuatan struktur dilakukan untuk bangunan yang riskan terhadap beban tambahan yang akan dipikul, sehingga perlu meningkatkan kemampuan bangunan tersebut atau menambahkan elemen struktur baru yang tidak tersedia atau dianggap tidak ada pada saat struktur dibangun. Perkuatan struktur biasanya dilakukan sebagai upaya untuk pencegahan sebelum struktur mengalami kegagalan, sedangkan perbaikan struktur diterapkan sebagai upaya untuk mengembalikan fungsi struktur seperti semula setelah mengalami penurunan kekuatan.

Beton geopolimer (GPC) telah diteliti selama beberapa dekade terakhir sebagai alternatif bahan konstruksi berkelanjutan, yang dapat meminimalkan emisi CO₂ dengan penggunaan produk sampingan industri. Penelitian sebelumnya tentang GPC menunjukkan bahwa material tersebut cocok untuk aplikasi struktural, dengan *workability* yang bisa diterapkan, dan tingkat kekuatan yang sebanding dengan beton semen Portland biasa (Hassan, Arif and Shariq, 2019). Geopolimer didefinisikan sebagai material yang dihasilkan



dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer SiO_4 dan AlO_4 yang terikat secara tetrahedral (Davidovits, 2020). Salah satu material *geopolymer* yaitu *fly ash* yang kaya dengan unsur Alumina (Al) dan Silika (Si).

Penelitian ini mengembangkan geopolimer berbasis *fly ash* (FA) sebagai bahan untuk perbaikan dan perkuatan struktur. *Fly ash* merupakan salah satu material yang biasa digunakan dalam pembuatan beton geopolimer. Beton ramah lingkungan terbentuk dari reaksi kimia, sedangkan beton konvensional terbentuk dari proses hidrasi (Davidovits, 2020). Penggunaan *fly ash* sebagai pilihan dalam pembuatan geopolimer merupakan salah satu penemuan untuk mengurangi timbunan produk samping pada pembangkit listrik. Menurut Hardjito dkk (Hardjito *et al.*, 2004) dan Hashim *et al.* (Hashim *et al.*, 2015), pengikatan geopolimer dibentuk dengan mencampur *fly ash* dan larutan alkali, di mana Natrium Hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 8 hingga 16 molar dapat diaplikasikan.

Kendala umum yang sering ditemukan pada beton geopolimer adalah konsistensi, yang biasanya lebih rendah dari beton konvensional. Selain itu, retak mikro juga sering terjadi selama proses pengerasan karena sifatnya yang rapuh dan kekuatan tarik yang rendah. Perawatan yang tepat dan penambahan serat merupakan solusi untuk meminimalkan terjadinya retak awal. Beberapa serat, seperti serat alam dan serat sintetis, telah direkomendasikan untuk ditambahkan ke dalam campuran geopolimer. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa komposisi serat tertentu dapat meningkatkan sifat mekanik beton (Ekaputri *et al.*, 2016; Manfaluthy and Ekaputri, 2017). Polivinil alkohol (PVA) adalah salah satu serat yang direkomendasikan untuk *geopolymer* karena penyerapan airnya relatif rendah dan memiliki sifat tarik yang sangat baik.

Berkaitan dengan hal tersebut, penelitian ini mengkaji perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar geopolimer, dengan dan tanpa penambahan serat PVA. Uji lentur enam balok beton bertulang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Hasanuddin. Hubungan beban-lenturan, pola retak dan mode kegagalan struktur akan didiskusikan.

2. PROGRAM EKSPERIMENTAL

Studi eksperimen dilakukan untuk mengevaluasi perilaku lentur dalam hal ini hubungan beban dan perpindahan, mode kegagalan dari balok beton bertulang yang diperkuat dengan mortar *geopolymer* dengan dan tanpa penambahan serat PVA.

Mortar geopolimer

Mortar *geopolymer* terbuat dari *fly ash*, pasir dan aktivator yang terdiri atas *Sodium Hydroxide* (NaOH) dan *Sodium Silicate* (Na_2SiO_3). *Fly ash* berasal dari PLTU Bosowa di kabupaten Jeneponto, Sulawesi Selatan. Berdasarkan hasil uji X-Ray Fluorescence (XRF) dengan total komposisi kimia dari $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 60.07%, maka *fly ash* dikategorikan ke dalam kelas C menurut ASTM C 618. Adapun komposisi kimia *fly ash* tersaji pada Tabel 1. *Fly ash* kelas C dengan kandungan CaO yang cukup tinggi, menyebabkan waktu *setting* mortar *geopolymer* lebih cepat. Oleh karenanya ditambahkan Borax (Natrium Tetraborate/ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) untuk memperlambat waktu *setting*.

Tabel 1. Komposisi kimia *fly ash* (persen terhadap berat)

Oksida	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	H_2O	SO_3
%	37.04	11.41	11.62	19.24	0.57	0.72	4.53	0.51	1.37

Alkali activator yang terdiri dari *Sodium Silicate* (Na_2SiO_3) dan *Sodium Hydroxide* (NaOH) dibuat dengan rasio 1.5. Konsentrasi NaOH 8 Molar ditentukan berdasarkan penelitian Risdanareni (Risdanareni, Ekaputri and Triwulan, 2015). Rasio berat alkali terhadap *fly ash* adalah konstan sebesar 50:50. Pasir alam juga ditambahkan dalam campuran. Untuk menjaga *workability* yang baik dan mencegah terjadinya proses *setting* yang cepat, *polycarboxylate superplasticizer* ditambahkan ke dalam campuran dengan komposisi 2% terhadap berat *fly ash*.

PVA fiber dengan tipe NYCON-PVA RECS 15 (diameter 38 μm dan panjang 8 mm) ditambahkan untuk meningkatkan daktilitas dari mortar geopolimer. Fiber digunakan sebesar 0.6% terhadap volume total campuran, ditambahkan diakhir proses pencampuran untuk menghindari terjadinya pengumpalan (Zerfu dan Ekaputri, 2021). Komposisi campuran mortar *geopolymer* diperlihatkan pada Tabel 2. Mutu mortar *geopolymer* dikontrol menggunakan benda uji kubus dengan sisi 50 mm sebanyak 3 buah, dicuring dengan

moist curing sampai umur 28 hari dan diuji tekan.

Tabel 2. Komposisi campuran mortar *geopolymer* (kg/m³)

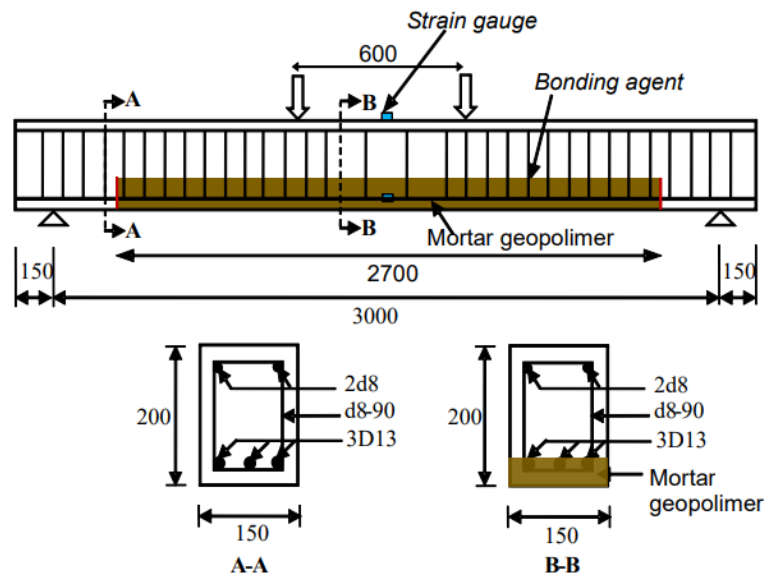
Kode	NaOH	Na ₂ SiO ₃	PVA	Pasir	Fly ash	Super plasticizer	Borax
GP	156	234	0	780	390	7.8	6
GPF	156	234	6.5	780	390	7.8	6

Benda uji

Enam balok beton bertulang dengan ukuran penampang 150 mm x 200 mm dan Panjang 3300 mm dibuat dengan 3 (tiga) variasi yaitu balok konvensional (BK), balok yang diperkuat dengan mortar geopolimer dengan dan tanpa penambahan serat PVA (BGP dan BGPF). Variasi benda uji disajikan pada Tabel 3. Panjang area perkuatan pada daerah tarik balok yaitu 2700 mm dan tebal 50 mm, jarak tumpuan ke tumpuan sejauh 3000 mm. Detail benda uji diperlihatkan pada Gambar 1. Benda uji dibuat menggunakan beton *ready mix* dengan kuat tekan rencana 22 MPa. Mutu beton normal (BN) dikontrol menggunakan benda uji silinder diameter 100 mm dan tinggi 200 mm sebanyak 3 buah yang diletakkan disamping benda uji balok dan dicuring dengan *moist curing* hingga waktu pengujian, sehingga keduanya memiliki perlakuan yang sama.

Tabel 3. Variasi benda uji

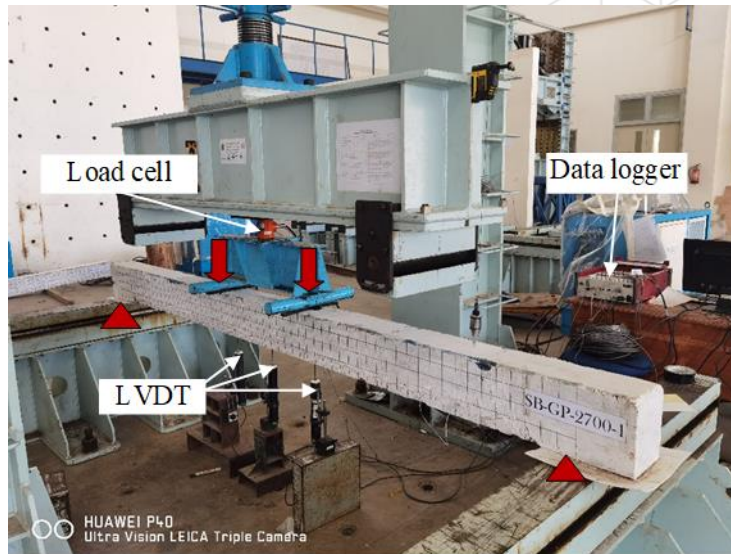
Kode	Material Perkuatan	Jumlah
BK	-	2
BGP	Mortar <i>geopolymer</i>	2
BGPF	Mortar <i>geopolymer</i> + PVA	2



Gambar 1. Dimensi benda uji

Setting benda uji

Semua benda uji balok diuji menggunakan *static load frame* berkapasitas 1500 KN dengan metode kontrol beban, kecepatan pembebanan 0.15 mm/sec. Gambar 2 memperlihatkan *Setup* benda uji. Tiga buah LVDT diletakkan pada sisi bawah balok untuk mengukur besar lendutan yang terjadi. *Strain gauge* tipe PL-60-11 dan FLA-2-11 direkatkan pada sisi tekan beton dan tulangan tarik untuk mengukur besar regangan.



Gambar 2. Setup pengujian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Ada dua jenis pengujian yang dilakukan yaitu pengujian sifat mekanis material (beton normal, mortar *geopolymer* dan baja tulangan) dan pengujian lentur balok beton bertulang. Pengujian sifat mekanis berupa uji tekan atau uji Tarik untuk mengetahui kekuatan material yang digunakan pada balok beton bertulang. Sedangkan pengujian lentur balok beton bertulang dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan mortar geopolimer dengan dan tanpa penambahan serat PVA terhadap perilaku lentur balok beton bertulang, dalam hal ini hubungan beban-lendutan, pola retak dan mode kegagalan yang terjadi.

Sifat mekanis material

Beton dan mortar *geopolymer* diuji tekan pada umur 28 hari setelah dirawat dengan *moist curing*. Nilai kuat tekan rata-rata benda uji ditampilkan pada Tabel 4. Nilai kuat tekan mortar *geopolymer* (GP dan GPF) lebih rendah dari beton normal. Hasil uji tarik baja tulangan ulir D13 dan tulangan polos d8 dari masing-masing 3 benda uji diperoleh tegangan leleh (f_y) D13 sebesar 336 MPa dan f_y d8 sebesar 384 MPa.

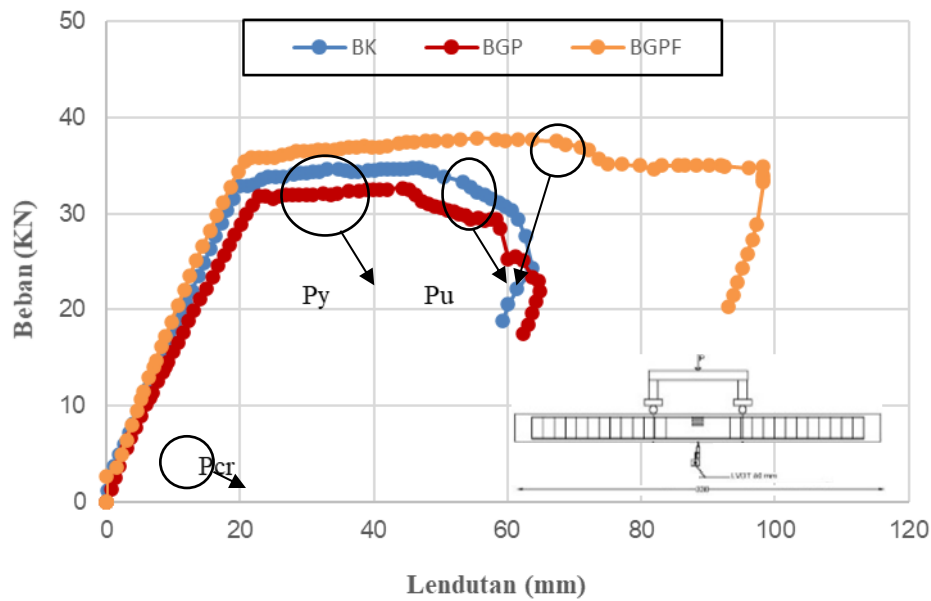
Tabel 4. Kuat tekan beton dan mortar *geopolymer*

Kode	Kuat Tekan (MPa)	Persentase (%)
BN	24.40	-
GP	14.27	58.5
GPF	21.87	89.6

Hubungan beban-lendutan

Secara umum, perilaku hubungan beban-lendutan dibagi menjadi 3 fase. Fase pertama adalah fase dimana beton masih dalam kondisi elastis. Fase kedua adalah fase pasca retak, dan fase ketiga adalah fase dimana tulangan leleh. Peralihan dari masing-masing fase ditandai dengan perubahan kekakuan pada grafik hubungan beban-lendutan. Titik peralihan pertama digunakan untuk mengidentifikasi retak awal dan titik peralihan kedua digunakan untuk mengidentifikasi leleh pada tulangan.

Gambar 3 menunjukkan hubungan beban-lendutan balok BK, BGP, dan BGPF. Lendutan yang ditunjukkan pada gambar tersebut merupakan lendutan yang terjadi di tengah bentang. Besar beban dan lendutan disetiap fase disajikan pada Tabel 5. Ketiga variasi benda uji memperlihatkan grafik trilinear, dimana balok mengalami retak pada pembebanan awal. Seiring dengan bertambahnya beban, balok berperilaku *elastoplastic* hingga tulangan baja meleleh, kemudian beban cenderung konstan dengan penambahan lendutan hingga balok mengalami keruntuhan.



Gambar 3. Hubungan beban-lendutan

Beban maksimum pada BGP menurun 6,52% dibandingkan BK. Hal ini disebabkan oleh kuat tekan mortar geopolimer lebih rendah dari beton normal dan bersifat getas (*brittle*), sehingga menimbulkan banyak retak yang berimplikasi pada penurunan kapasitas balok dalam memikul beban. Dengan penambahan serat PVA pada mortar *geopolymer*, beban maksimum BGPF meningkat 9,02% terhadap BK dan memperlihatkan perilaku yang lebih duktail daripada BK dan BGP. Efek dari penambahan serat PVA, selain meningkatkan kapasitas balok dalam memikul beban, juga mampu meminimalisir *microcrack* yang terjadi selama proses pengerasan (*hardening process*) dan mereduksi jumlah retak akibat beban lentur, meskipun kuat tekan GPF lebih rendah dari BN.

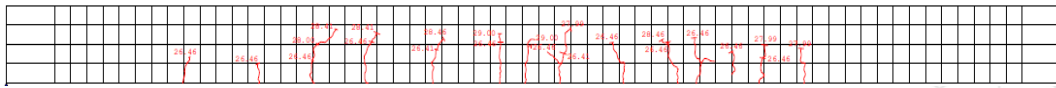
Tabel 5. Beban dan lendutan ditiap fase

Kode	Beban (KN)			Lendutan (mm)		
	P _{cr}	P _y	P _u	δ _{cr}	δ _y	δ _u
BK	4.93	32.92	34.78	1.87	19.88	43.77
BGP	5.53	31.85	32.65	2.97	22.78	44.28
BGPF	6.46	35.85	37.92	2.25	21.63	55.40

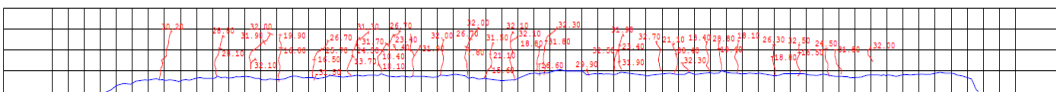
Note: cr (*crack*) = kondisi retak awal; y (*yield*) = kondisi leleh; u (*ultimate*) = kondisi *ultimate*

Pola retak dan mode kegagalan

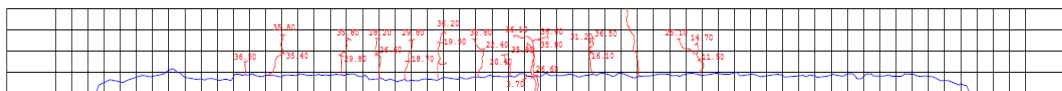
Gambar 4 menunjukkan pola retak pada semua benda uji. Secara umum, semua balok mengalami retak lentur yang ditandai dengan retak dalam arah vertikal. Retak berawal ditengah bentang dan bertambah panjang, merambat dari sisi tarik ke sisi tekan balok. Pada BGP, retak dimulai pada area sambungan antara mortar *geopolymer* dan beton normal. Pada area ini juga ditemukan *micro-crack*. Namun pada BGPF, tidak ditemukan adanya *micro-crack* dan jumlah retak lebih sedikit dibandingkan BK dan BGP. *Bridging effect* dari penambahan serat PVA pada mortar *geopolymer* mampu mengurangi lebar dan laju perkembangan retak akibat beban lentur.



a. BK



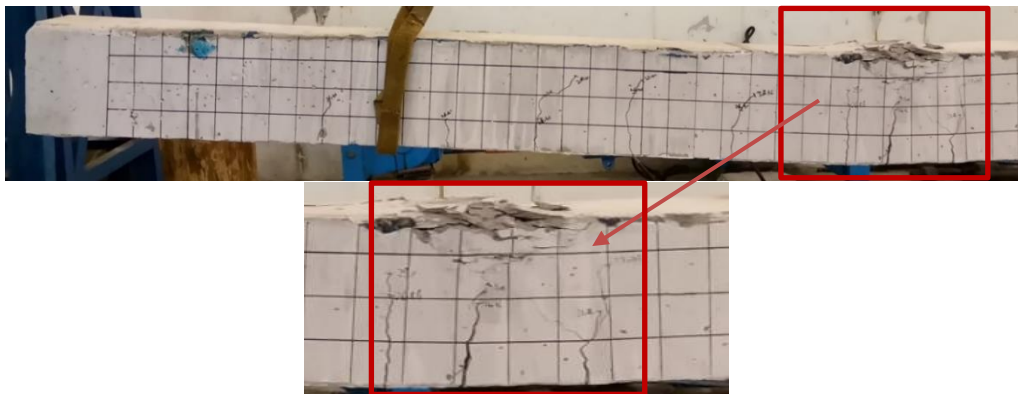
b. BGP



c. BGPF

Gambar 4. Pola retak benda uji

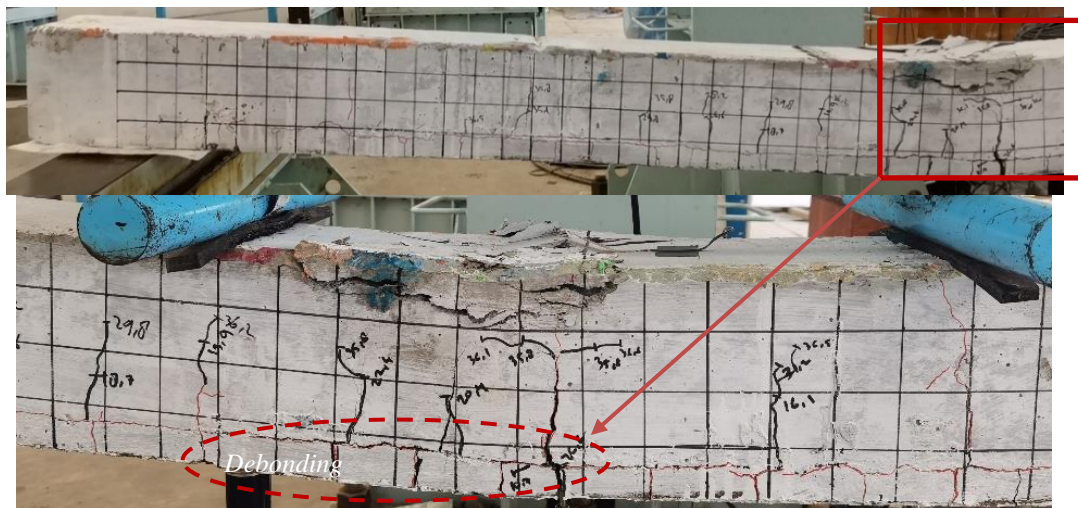
Gambar 5 memperlihatkan mode kegagalan balok. Balok kontrol (BK) mengalami kegagalan lentur (*flexural failure*) pada kondisi *under-reinforced* yang ditandai dengan tulangan tarik telah meleleh diikuti dengan hancurnya beton pada sisi tekan (Gambar 5a). Pada BGP, ditemukan *micro-crack* pada sambungan beton normal dan mortar geopolimer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5b. Dari sisi perkembangan retak, hampir seluruh retak berawal dari *microcrack* yang terjadi pada area sambungan. Pada saat beban maksimum, beton pada sisi tekan hancur dan terjadi kegagalan sambungan akibat adanya delaminasi beton normal dan mortar geopolimer (Gambar 5b). Sedangkan pada BGPF, balok mengalami kegagalan *debonding* yaitu hilangnya lekatan antara beton normal dan mortar geopolimer yang terlihat dari terputusnya retak-retak pada sambungan seperti pada Gambar 5c, dan beton pada sisi tekan hancur pada beban maksimum.



a. Kegagalan lentur pada BK



b. Kegagalan delaminasi pada BGP



c. Kegagalan *debonding* pada BGPF

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan diskusi, dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan mortar geopolimer sebagai material perkuatan balok tidak memberikan efek positif dalam peningkatan beban. Namun dengan penambahan serat PVA 0.6% terhadap volume total campuran mortar geopolimer, mampu mengurangi terjadinya *microcrack* khususnya di daerah sambungan antara beton dan mortar, sehingga kapasitas balok dalam memikul beban meningkat 9,02% dibandingkan balok kontrol. Adanya serat PVA juga berpengaruh terhadap mode kegagalan balok, dimana balok dengan perkuatan mortar geopolimer tanpa serat PVA mengalami kegagalan delaminasi, sementara balok dengan perkuatan mortar geopolimer dan serat PVA mengalami kegagalan *debonding*.

DAFTAR PUSTAKA

- Davidovits, J. (2020) *Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition, J. Davidovits.–Saint-Quentin, France.*
- Ekaputri, J. J. *et al.* (2016) 'Effect of PVA fiber in increasing mechanical strength on paste containing glass powder', *Key Engineering Materials*, 673(August), pp. 83–93. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.673.83.
- Hardjito, D. *et al.* (2004) 'On the development of fly ash-based geopolymer concrete', *ACI Materials Journal*, 101(6), pp. 467–472. doi: 10.14359/13485.



- Hashim, A. N. *et al.* (2015) 'Effect of Sodium Hydroxide (NaOH) Concentration on Compressive Strength of Alkali-Activated Slag (AAS) Mortars', *Applied Mechanics and Materials*, 754–755(March), pp. 300–304. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.754-755.300.
- 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*. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.051.
- Manfaluthy, M. L. and Ekaputri, J. J. (2017) 'The Application of PVA Fiber to Improve the Mechanical Properties of *Geopolymer* Concrete', *MATEC Web of Conferences*, 138. doi: 10.1051/mateconf/201713801020.
- Risdanareni, P., Ekaputri, J. J. and Triwulan (2015) 'The influence of *Alkali activator* concentration to mechanical properties of *geopolymer* concrete with trass as a filler', *Materials Science Forum*, 803(August), pp. 125–134. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.803.125.
- Zerfu, K. and Ekaputri, J. J. (2021) 'Bond strength in PVA fibre reinforced *fly ash*-based *geopolymer* concrete', *Magazine of Civil Engineering*, 101(1). doi: 10.34910/MCE.101.5.