

**PERBANDINGAN SIFAT DAN KARAKTERISTIK BETON  
GEOPOLIMER TERHADAP BETON SEMEN PORTLAND UNTUK  
KEKUATAN STRUKTUR BALOK  
(COMPARISON OF THE PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF  
GEOPOLYMER CONCRETE AND PORTLAND CEMENT CONCRETE  
FOR STRUCTURAL BEAM STRENGTH)**

**N. Retno Setiati<sup>1)</sup> dan Rulli Ranastra Irawan<sup>2)</sup>**

<sup>1)2)</sup>Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

<sup>1)2)</sup>Jl. A.H. Nasution No. 264 Bandung 40294

e-mail: <sup>1)</sup>retno.setiati@pusjatan.pu.go.id, <sup>2)</sup>rulli.ranastra@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 24 Oktober 20018; direvisi: 21 November 2018; diterima: 13 Desember 2018

**ABSTRAK**

*Abu terbang merupakan hasil pembakaran batu bara dari beberapa PLTU. Abu terbang kelas F adalah tipe abu terbang yang umumnya digunakan untuk campuran beton. Makalah ini membahas hasil penelitian tentang pengaruh penambahan 100% abu terbang sebagai pengganti semen pada campuran beton (beton geopolimer). Uji laboratorium dilakukan dengan membuat model fisik balok beton bertulang. Kemudian, hasil uji beton geopolimer dibandingkan dengan beton konvensional. Untuk mengetahui sifat mekanik beton, dibuat benda uji silinder ukuran 150 mm x 300 mm dan balok dengan ukuran 150 mm x 150 mm x 600 mm. Untuk mengetahui kapasitas struktur beton geopolimer dan konvensional dibuat balok struktural berukuran 150 mm x 350 mm dengan panjang 4000 mm sebanyak dua buah. Pengujian model fisik balok struktural mengacu pada ACI 437.1R-07. Hasil uji beton struktural laboratorium dibandingkan terhadap perhitungan secara teoritis. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa pada balok beton bertulang dengan komposisi 100% abu terbang kekuatannya hampir setara dengan beton konvensional. Berdasarkan hasil uji, nilai kapasitas beban yang dapat dipikul struktur balok beton geopolimer sebesar 87,5 kN dengan deviasi 38% terhadap nilai teoritis. Untuk struktur balok beton konvensional, beban yang dipikul sebesar 109,2 kN dengan deviasi 25% terhadap nilai teoritis. Nilai kapasitas struktur balok beton geopolimer dan konvensional berdasarkan hasil uji laboratorium lebih kecil dibandingkan nilai secara teoritis.*

**Kata kunci:** semen Portland, abu terbang, beton konvensional, beton geopolimer, balok beton bertulang.

**ABSTRACT**

*Fly ash is a coal combustion product from several power plants. Currently, F type fly ash is commonly used for concrete mixes. This study discusses the effect of 100% addition of fly ash on concrete mixes. In this study cement is substituted with fly ash. Laboratory testing is performed by making a physical model in the form of reinforced concrete beams. Test results were compared between geopolimer concrete and conventional concrete. To determine the mechanical properties of concrete, the specimen was made in a cylindrical shape measuring 150 mm x 300 mm and a beam measuring 150 mm x 150 mm x 600 mm. To determine the structural capacity of geopolimer and conventional concrete, two structural beams measuring 150 mm x 350 mm with a length of 4000 mm were made. The testing of structural beams was undertaken according to the ACI 437.1R-07. Then, the laboratory test results are compared to the theoretical analysis. Based on the results it was found that beams strength made of geopolimer concrete is almost equivalent to the conventional concrete. Based on the test results, the load capacity of the geopolimer concrete beam structure of 87.5 kN with a deviation of 38% for theoretical analysis. For conventional concrete, the load capacity is 109.2 kN with a deviation of 25% compared to theoretical analysis. In addition, the structural capacity value of geopolimer and conventional concrete beams based on the results of laboratory tests is smaller than the results of theoretical analysis.*

**Keywords:** Portland cement, fly ash, conventional concrete, geopolimer concrete, reinforced concrete beam.

## PENDAHULUAN

Pemanfaatan abu terbang sebagai bahan campuran beton sudah banyak dilakukan di beberapa Negara dan merupakan salah satu solusi dalam mengurangi pencemaran lingkungan. Abu terbang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara PLTU dan dapat digunakan sebagai bahan substitusi semen. Pembuatan beton sebagai material konstruksi tidak terlepas dari semen. Semen yang diproduksi dari beberapa pabrik dapat menimbulkan pencemaran lingkungan udara berupa gas emisi CO<sub>2</sub>. Satu ton produksi semen sebanding dengan satu ton gas CO<sub>2</sub> yang dihasilkan. Semakin banyak semen yang diproduksi menyebabkan tingkat pencemaran udara semakin tinggi pula. Untuk mengurangi dampak penggunaan semen dalam bidang konstruksi, maka pemanfaatan limbah abu terbang merupakan salah satu cara yang tepat digunakan untuk membuat beton. Selain sebagai bahan substitusi semen, pemanfaatan abu terbang dalam beton dapat mengurangi jumlah limbah batubara yang dihasilkan dari beberapa PLTU batu bara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan sifat mekanik antara beton dengan dan tanpa menggunakan 100% abu terbang. Hasil uji laboratorium kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan secara teoritis. Untuk mengetahui perbedaan sifat beton dengan penambahan abu terbang dan beton konvensional dilakukan pengujian eksperimental di laboratorium.

## KAJIAN PUSTAKA

Abu terbang adalah salah satu limbah yang dihasilkan dalam pembakaran batubara berbentuk partikel-partikel halus. Menurut PP No. 85 Tahun 1999 abu terbang masuk dalam kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) karena terdapat kandungan oksida logam berat yang akan mengalami pelindihan secara alami dan mencemari lingkungan (Indonesia

1999). Pelindihan adalah proses ekstraksi zat dari padatan dengan melarutkannya dalam cairan baik secara alami maupun melalui suatu proses industri. Tata cara mengenai pengelolaan limbah B3 diatur dalam PP No. 101 Tahun 2014. Namun dari beberapa penelitian yang dilakukan di Negara lain, abu terbang tidak termasuk dalam kategori limbah B3. Menurut Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (*U.S. Environmental Protection Agency* 2014) abu terbang diklasifikasikan sebagai limbah “*non-hazardous*”, tidak menyebabkan pencemaran pada air, tidak berdampak pada kesehatan masyarakat, dan salah satu pencemaran yang sering terjadi dan mengganggu kesehatan adalah pencemaran udara. Kurda, Silvestre, and Brito (2018) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa penggunaan abu terbang berdampak pada pengurangan terjadinya pencemaran lingkungan. Gas emisi CO<sub>2</sub> dapat diturunkan dari 18% menjadi 57% dengan meningkatkan kadar abu terbang dalam beton dari 24% hingga 70%. Komposisi senyawa kimia abu terbang berbeda antara satu produksi dengan produksi lainnya. Perbedaan tersebut tergantung dari sumber batubara dan metode pembakaran yang digunakan pada setiap PLTU. Namun secara umum abu terbang lebih dominan mengandung senyawa oksida (SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Perbedaan dari beberapa tipe abu terbang tergantung dari jumlah kadar senyawa oksida (SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan kadar CaO (kapur) yang terkandung dalam abu terbang tersebut. Abu terbang terbagi dalam tiga kelas yaitu kelas F, kelas C, dan kelas N. Pada umumnya abu terbang kelas F banyak digunakan sebagai bahan substitusi semen karena banyak mengandung senyawa oksida lebih dari 50% dan kapur (CaO) yang kurang dari 10%. Persyaratan komposisi kimia abu terbang yang dapat digunakan sebagai bahan substitusi semen berdasarkan SNI 2460 : 2014 (BSN 2014) ditunjukkan dalam Tabel 1.

**Tabel 1.** Persyaratan komposisi senyawa kimia abu terbang untuk beton

No.	Uraian	Kelas F
1	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min.	70%
2	SO <sub>3</sub> , maks.	5%
3	Kadar air, maks.	3%
4	Hilang pijar, maks.	6%
5	CaO	Kurang dari 10%

Sumber: BSN (2014)

Berdasarkan Tabel 1, untuk abu terbang kelas F diproduksi dari pembakaran batubara *anthracite* atau *bituminous*, dan mempunyai sifat *pozzolanic*. Untuk mendapatkan sifat cementitious harus diberi penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen. Kadar kapur (CaO) harus kurang dari 10%. Penambahan abu terbang sebagai bahan substitusi semen dapat meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton. Keuntungan lain dari beton abu terbang ini adalah mudah dikerjakan, dapat mengurangi *bleeding*, lebih tahan terhadap korosi, mempunyai permeabilitas tinggi, tahan terhadap sulfat, dapat mengurangi panas hidrasi, lebih ekonomis, dan dapat menaikkan kekuatan akhir beton. Penelitian tentang penggunaan abu terbang dalam beton sudah dilakukan sekitar tahun 1970-an dan sampai saat ini mengalami perkembangan yang sangat pesat. Ghais et al (2014) membandingkan penggunaan abu terbang dan kaolin dalam pembuatan beton. Hasilnya menyebutkan bahwa penambahan 10% abu terbang dapat meningkatkan kekuatan beton sedangkan penambahan kaolin dapat mengurangi kekuatan dan *workability* beton. Abu terbang meningkatkan sifat beton lebih baik daripada kaolin. Komposisi kalsium dan aluminium dalam abu terbang lebih tinggi dari pada kaolin, yang meningkatkan reaksi pozolan ketika air ditambahkan ke dalam campuran beton abu terbang. Salain, Sutarja, dan Eryantha (2014) dalam penelitiannya menambahkan kadar abu terbang dalam beton sebanyak 10%, 20%, 30%, dan 40%. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus berukuran 150 mm x 150 mm x 150 mm. Peningkatan kuat tekan secara signifikan terjadi pada kadar optimum abu terbang sebesar 10%. Selanjutnya kuat tekan beton cenderung turun dengan penggunaan abu terbang di atas 10%. Proses reaksi dalam beton yang menggunakan sedikit abu terbang sangat berbeda dengan beton geopolimer. Beton geopolimer adalah jenis beton yang tidak menggunakan 100% semen Portland.

Geopolimer merupakan produk beton geosintetik di mana reaksi pengikatan yang terjadi adalah reaksi polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi, aluminium (Al) dan Silika (Si) mempunyai peran penting dalam ikatan polimerisasi. Reaksi Aluminium (Al) dan Silika yang terkandung dibahan dasar dengan larutan alkali akan menghasilkan rangkaian panjang

$AlO_4$  dan  $SiO_4$ . Beton geopolimer memiliki sifat fisik yang cepat mengeras, sehingga kuat tekan dapat dicapai pada umur awal setelah beton tersebut di cetak (Davidovits 1994). Abu terbang digunakan sebagai sumber material untuk membuat binder yang dibutuhkan dalam campuran beton geopolimer. Beton ini terbentuk dari reaksi kimia dan bukan dari reaksi hidrasi seperti pada beton biasa. Jenis aktivator beton geopolimer harus sesuai dengan senyawa yang terkandung dalam abu terbang dan juga komposisinya harus tepat sehingga bisa terjadi reaksi kimia. Aktivator yang umum digunakan adalah *Sodium Hidroksida* dan *Sodium Silikat* ( $Na_2SiO_3$ ) (Risdanareni, Triwulan, dan Ekaputri 2014). Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan beton geopolimer ini memiliki beberapa keunggulan yaitu tidak memerlukan konsumsi energi yang besar seperti pada beton konvensional, tidak memancarkan  $CO_2$  ke udara sehingga dapat mengurangi efek pemanasan global, memiliki volume yang stabil karena penyusutan yang terjadi 4/5 kali lebih rendah jika dibandingkan beton konvensional, kekuatannya dicapai dalam waktu yang singkat karena kekuatan tekan beton ini mampu mencapai 70% dalam waktu 4 jam pertama, memiliki ketahanan yang tinggi karena beton ini tahan terhadap serangan lingkungan agresif tanpa mengurangi fungsi yang dimilikinya (Li, Ding, and Zhang 2004).

Takapente dkk (2018) menyebutkan bahwa penggunaan material agregat kasar dan agregat halus pada beton geopolimer, tidak jauh berbeda dari beton pada konvensional. Penggunaan komposisi agregat berkisar antara (60 – 75)% dari berat campuran beton dan sisanya adalah sebagai pasta semen atau sebagai pengikat. Nilai kuat tekan beton mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu perawatan (*curing*). Berdasarkan klasifikasi berat jenis beton, berat volume beton geopolimer termasuk beton berbobot normal. Madhavi, Raju, and Mathur (2014) menggunakan rasio air semen yang rendah dalam pembuatan beton berbasis abu terbang. Penggunaan *superplasticizer* atau HRWR sangat penting untuk memastikan kemampuan kerja. Peningkatan kadar abu terbang meningkatkan kemampuan kerja bila dibandingkan dengan beton konvensional dengan kadar air yang sama. Bentuk bulat dan distribusi ukuran partikel abu terbang

meningkatkan fluiditas beton dan dengan demikian kebutuhan air dalam campuran berkurang, sehingga berkontribusi terhadap kekuatan jangka panjang. Anggie dkk (2014) dalam hasil risetnya menyimpulkan bahwa varian campuran beton geopolimer yang menggunakan superplasticizer (0,2 – 2)% dapat dikategorikan sebagai *self compacting geopolymer concrete*.

## HIPOTESIS

Struktur beton geopolimer yang dibuat dengan penambahan 100% abu terbang (tanpa semen Portland) dapat memiliki sifat kekuatan yang setara dengan beton berbasis semen OPC.

## METODOLOGI

Metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari pemeriksaan abu terbang, perencanaan *mix design*, pencampuran beton, pembuatan benda uji, perawatan, dan pengujian sifat mekanik balok beton. Abu terbang yang digunakan merupakan produk sampingan hasil pembakaran batu bara Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa yang terkandung di dalam abu terbang. Perencanaan *mix design* dilakukan dengan *trial mix* karena sampai saat ini belum terdapat standar atau pedoman mengenai desain campuran beton geopolimer. Proses pencampuran dilakukan setelah melakukan proses desain.

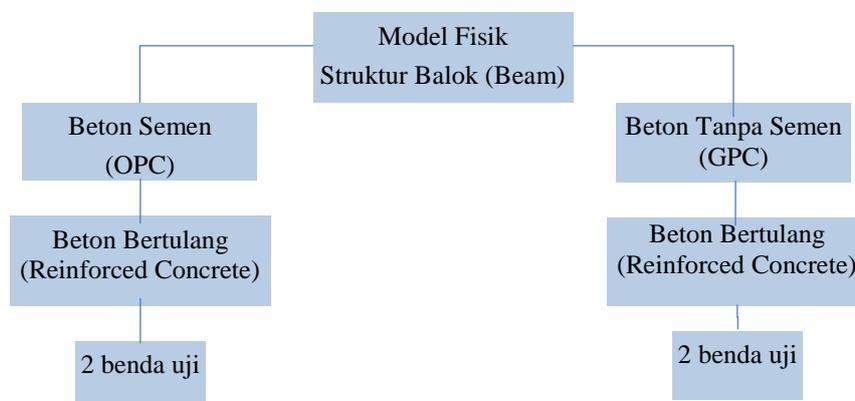
Komposisi berat tiap bahan beton ditentukan sesuai dengan kriteria yang terdapat dalam standar desain beton konvensional.

Proses pencampuran meliputi rangkaian berikut:

1. Mencampur agregat kasar dan agregat halus dalam keadaan kering permukaan (SSD) beserta abu terbang di dalam *concrete mixer*.
2. Membuat larutan aktivator alkali dalam wadah.
3. Larutan aktivator alkali merupakan campuran dari cairan NaOH dan Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>.
4. Mencampur *superplasticizer* dan air dalam wadah, kemudian campurkan kedalam larutan aktivator yang sudah homogen.
5. Memasukkan semua cairan yang sudah dicampurkan ke dalam *concrete mixer*.
6. Semua material diaduk sampai mendapatkan kondisi homogen (*fresh concrete*) kurang lebih 20 menit.
7. Melakukan tes *slump* untuk mengetahui besar nilai *slump* yang didapat.

Adapun jenis aktivator yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu *Sodium Silikat* dan *Sodium Hidroksida*. *Sodium hidroksida* dalam bentuk serbuk terlebih dahulu harus dilarutkan dengan air 8 Molar, 10 Molar, dan 14 Molar.

Pengujian tingkat reaktifitas aktivator terhadap kuat tekan dilakukan pada benda uji berbentuk mortar. Perawatan benda uji beton geopolimer berbeda dengan beton konvensional. Material geopolimer membutuhkan energi aktivasi tambahan untuk mempercepat proses polimerisasi. Hal ini disebabkan karena panas yang dihasilkan kurang tinggi.



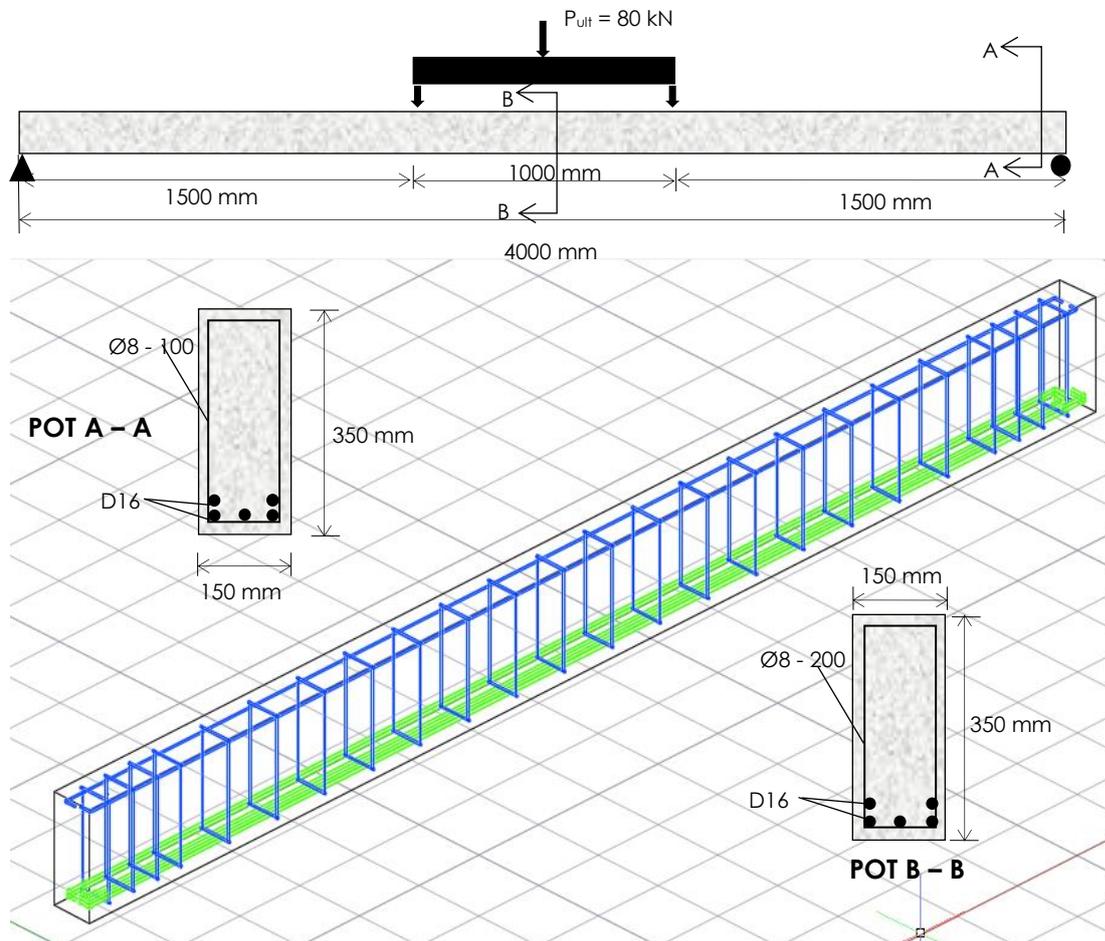
**Gambar 1.** Bagan alir pembuatan benda uji balok beton geopolimer dan beton konvensional

Agar proses perkerasan berlangsung cepat, benda uji yang telah dicetak dimasukkan ke dalam oven dengan suhu  $60^{\circ}\text{C}$ , lama pengovenan divariasikan dari 4, 8, 12 sampai 24 jam, Setelah itu benda uji dibiarkan pada suhu kamar. Pembuatan model fisik berupa balok dibuat dalam 2 (dua) variasi campuran beton. Variasi campuran pertama adalah balok beton bertulang dengan 100% abu terbang dan variasi kedua adalah balok beton bertulang dengan menggunakan 100% semen Portland sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1.

Benda uji lain dibuat dalam bentuk silinder berukuran  $150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$  dan balok berukuran  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ . Pada

benda uji silinder akan dilihat perbandingan sifat mekanik berupa kuat tekan dan kuat tarik belah antara beton dengan dan tanpa 100% abu terbang, sedangkan pada balok struktural akan dilihat kuat lentur secara tidak langsung.

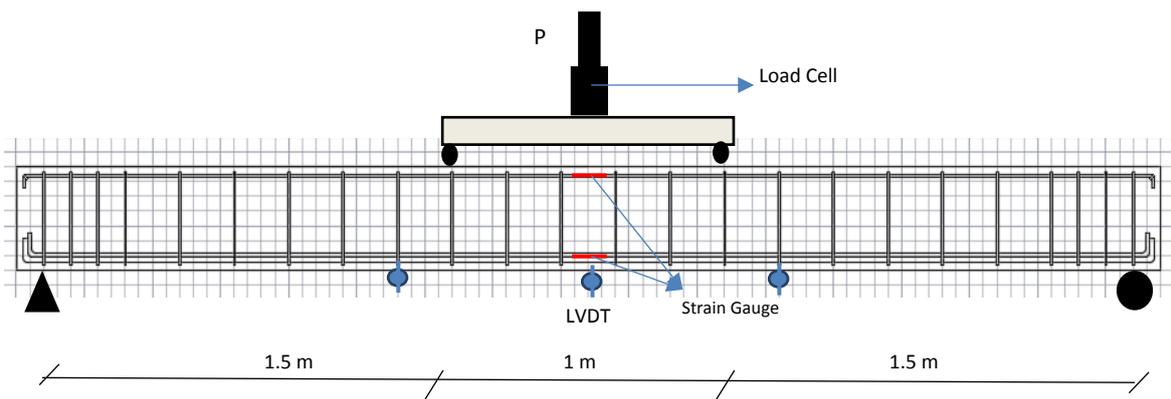
Pembuatan model fisik berupa struktur balok beton bertulang dilakukan untuk mengetahui kapasitas penampang struktur balok yang menggunakan beton geopolimer dan beton semen. Ukuran struktur balok beton bertulang mempunyai ukuran penampang  $150\text{ mm} \times 350\text{ mm}$  dengan panjang bentang balok  $4000\text{ mm}$ . Dalam struktur balok dipasang tulangan tarik dan sengkang sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.



**Gambar 2.** Skema penulangan struktur balok beton bertulang geopolimer dan beton konvensional

Berdasarkan Gambar 2, diameter tulangan tarik dan sengkang balok beton bertulang adalah 5 D 16 dan  $\text{Ø} 8$ . Skema pengujian kapasitas struktur balok beton bertulang mengacu pada ACI 437.1R-07 *Load tests of Concrete Structures : Methods, Magnitude, Protocols, and*

*Acceptance Criteria*. Di dalam code tersebut dijelaskan perihal yang terkait dengan metode pengujian untuk mengevaluasi kapasitas struktur balok yang telah dibuat. Skema pengujian kapasitas lentur struktur balok ditunjukkan dalam Gambar 3 (ACI 2007).

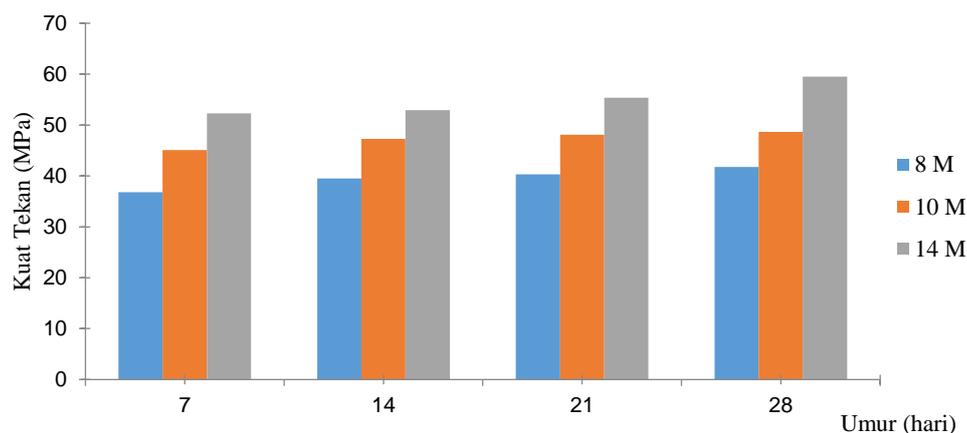


**Gambar 3.** Skema pengujian kuat lentur struktur balok beton berulang geopolimer dan beton konvensional

Berdasarkan Gambar 3 skema pengujian kuat lentur balok beton bertulang dimaksudkan untuk mengetahui parameter kapasitas momen dan beban maksimum, pola retak, serta lendutan pada saat pembebanan. *Strain gauge* dipasang pada lokasi tarik dan tekan tulangan.

### HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian kuat tekan mortar terhadap konsentrasi dari aktivator yang digunakan untuk beton geopolimer ditunjukkan dalam Gambar 4.



**Gambar 4.** Kuat tekan mortar geopolimer pada molaritas larutan NaOH 8 M, 10 M, dan 14 M

Berdasarkan hasil uji kuat tekan mortar geopolimer pada Gambar 4, campuran dengan konsentrasi NaOH 14 Molar masih memberikan nilai kuat tekan maksimum dari konsentrasi 8 M dan 10 M larutan NaOH sehingga merupakan konsentrasi optimum dari ketiga larutan tersebut. Hal ini pernah diteliti oleh Ekaputri (2013) yang menyimpulkan bahwa larutan aktivator dengan konsentrasi 14 M adalah yang paling optimum. Setelah

ditentukan konsentrasi optimum dari larutan aktivator kemudian dibuat *mix design* komposisi campuran beton geopolimer. Komposisi campuran beton dengan 100% abu terbang (beton geopolimer) dan 100% semen Portland (beton semen) diperoleh setelah dilakukan pengujian material pembentuk beton. Tabel 2 menunjukkan komposisi material pembentuk beton.

**Tabel 2.** Komposisi beton geopolimer dan beton semen Portland

No.	Material	Beton geopolimer (kg/m <sup>3</sup> )	Beton semen Portland (kg/m <sup>3</sup> )
1	Abu terbang	625,30	-
2	Semen	-	412,50
3	Natrium silikat (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> )	202,02	-
4	Natrium hidroksida (NaOH)	35,30	-
5	Agregat halus	933,66	997,50
6	Agregat kasar	704,34	752,50
7	Superplasticizer (SP)	5,20	5,00
8	Air	130,81	345,75
Berat total material		2636,63	2513,25

Tabel 2 menunjukkan perbandingan komposisi material pembentuk beton geopolimer dan beton dengan menggunakan semen Portland (beton konvensional). Komposisi agregat halus yang digunakan setiap kubikasi beton geopolimer dan beton semen berturut-turut sebesar 35,41% dan 39,69% dan untuk agregat kasar komposisinya adalah 26,71% dan 29,94%. Jumlah NaOH yang diperlukan untuk setiap kubikasi beton geopolimer sebanyak 35,30 kg. Molaritas yaitu suatu besaran yang menyatakan banyaknya mol zat terlarut terhadap setiap liter larutan. Dengan konsentrasi larutan NaOH 14 Molar, maka volume larutan aktivator yang diperoleh untuk setiap kubikasi beton geopolimer sebanyak 63,035 liter (dengan berat senyawa kimia NaOH atau Mr = 40).

Hasil pengujian kuat tarik belah beton dan kuat tekan beton benda uji silinder dilakukan pada umur di atas 28 hari. Kuat tekan beton dihitung berdasarkan SNI 1974 : 2011 (BSN 2011) dengan persamaan (1).

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

$\sigma$  adalah kuat tekan beton (MPa)

$P$  adalah gaya aksial (N)

$A$  adalah luas penampang silinder

Luas penampang dari silinder ( $A$ ) adalah:

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \{150 \text{ mm}\}^2}{4} = 17671,46 \text{ mm}^2.$$

Analisis perhitungan kuat tarik belah beton silinder berdasarkan SNI 2491:2014 (BSN 2014) menggunakan persamaan (2).

$$f_t = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

$f_t$  : kuat tarik belah beton (MPa)

$P$  : gaya aksial (N)

$L$  : tinggi silinder beton (mm)

$D$  : diameter silinder beton (mm)

Besarnya kuat tekan dan tarik belah beton geopolimer dan beton semen dapat dilihat dalam Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil uji kuat tekan dan tarik belah beton geopolimer dan beton semen OPC

No.	Identifikasi benda uji	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	Kuat tarik (MPa)	Kuat tarik rata-rata (MPa)
Beton geopolimer (100% abu terbang)					
1	GPC-1C	36,085	35,753	8,769	8,171
2	GPC-2C	35,420			
3	GPC-3C	35,753			
4	GPC-1T			8,769	
5	GPC-2T			7,574	
6	GPC-3T			8,172	
Beton semen Portland (100% semen OPC)					
1	OPC-1C	42,132	44,592		
2	OPC-2C	47,053			

No.	Identifikasi benda uji	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	Kuat tarik (MPa)	Kuat tarik rata-rata (MPa)
3	OPC-3C	44,592			
4	OPC-1T			12,053	
5	OPC-2T			13,102	12,578
6	OPC-3T			12,578	

Sumber : Pusjatan (2017)

Perhitungan kuat lentur balok sesuai dengan persamaan (3).

$$M = \frac{Pa'}{2} + \frac{qL^2}{8} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- $P$  : beban pada retak pertama (N)
- $L$  : jarak antar perletakan (mm)
- $a'$  : jarak dari  $P/2$  ke perletakan (mm)
- $q$  : berat sendiri beton (N/mm)

Berdasarkan persamaan (3) dan data teknis beton, berat jenis beton semen adalah 2100 kg/m<sup>3</sup> dan beton geopolimer adalah 2500 kg/m<sup>3</sup>, sehingga berat sendiri balok beton ( $q$ ) untuk beton geopolimer dan semen berturut-turut adalah 131,25 kg/m' dan 110,25 kg/m'. Bentang balok ( $L$ ) adalah 4000 mm. Momen kapasitas penampang struktur balok bertulang beton semen dan geopolimer dapat ditentukan dengan perhitungan berikut.

Berat beton semen $g_c$	=	2100	kg/m <sup>3</sup>
Berat beton geopolimer $g_g$	=	2500	kg/m <sup>3</sup>
Luas penampang balok $A_b$	=	0,05	m <sup>2</sup>
Berat sendiri beton semen $q_c$	=	131,25	kg/m'
Berat sendiri beton geopolimer $q_g$	=	110,25	kg/m'
Bentang balok ( $L$ )	=	4	m
Diameter tulangan tarik D16	=	16	mm
Luas tulangan tarik $A_s$	=	201,06	mm <sup>2</sup>
Tegangan leleh baja tulangan $f_s$	=	400	MPa
Tebal selimut beton (cover $c$ )	=	20	mm

Gaya tekan yang diberikan tulangan  $C_s$  dan beton  $C_c$  dihitung dengan persamaan (4) dan persamaan (5).

$$C_s = A_s f_s \dots\dots\dots (4)$$

$$C_c = 0,85 f_c' ab \dots\dots\dots (5)$$

$a$  adalah jarak tegangan tekan ekivalen terhadap garis netral dan dihitung dengan menggunakan persamaan (6).

$$a = \frac{A_s f_s}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots (6)$$

Momen kapasitas penampang balok dapat ditentukan setelah persamaan (4) sampai dengan persamaan (6) diketahui. Besarnya momen kapasitas ditentukan berdasarkan persamaan (7).

$$M_{kap} = A_s f_s \left\{ d - \frac{a}{2} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- $d'$ : jarak tulangan tarik terhadap serat tarik beton 36 mm.
- $d$ : jarak tulangan tarik terhadap serat tekan beton 314 mm.
- $h$ : tinggi balok 350 mm
- $b$ : lebar balok 150 mm

Dari Tabel 4 untuk beton semen, kuat tekan beton karakteristik  $f_c'$  adalah 44,59 MPa sedangkan beton geopolimer  $f_g$  sebesar 35,75 MPa.

## PEMBAHASAN

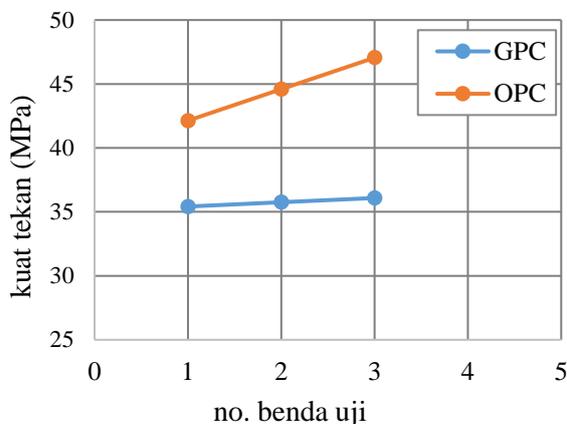
Molaritas aktivator alkalin yaitu NaOH sangat berpengaruh pada kuat mekanik binder maupun beton geopolimer. Semakin tinggi molaritas NaOH, semakin tinggi kuat mekanik beton maupun binder geopolimer yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar 4, hasil uji kuat tekan mortar geopolimer untuk konsentrasi NaOH sebesar 14 Molar memiliki peningkatan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan konsentrasi 8 M dan 10 M pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Aktivator yang digunakan dalam pembuatan binder adalah Natrium Hidroksida (NaOH) 14 M dan Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ).

Komposisi beton geopolimer sangat berbeda dengan beton konvensional sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2. Beton geopolimer ini adalah beton yang 100% tidak menggunakan semen. Karena itu digunakan material mengandung banyak *oksida silica* dan *alumina* yang diaktifkan dengan suatu larutan aktivator. Untuk menggantikan semen sebagai perekat agregat kasar maupun halus maka digunakan abu terbang. Proses polimerisasi yang terjadi di dalam beton geopolimer meliputi

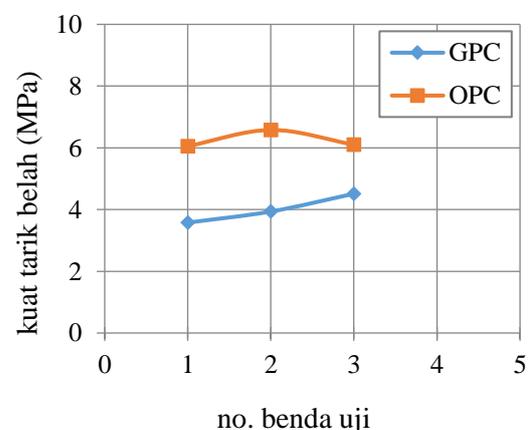
reaksi kimia yang terjadi antara alkalin dengan mineral *Si – Al* sehingga menghasilkan rantai *polymeric* tiga – dimensi dan ikatan struktur *Si – O – Al – O* yang konsisten. Sedangkan pada beton konvensional reaksi yang dihasilkan merupakan reaksi hidrasi. Berat total material pembentuk beton geopolimer lebih besar dari beton semen Portland.

Berdasarkan komposisi beton sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 2, berat total material pembentuk beton geopolimer adalah 2636,63 kg dan beton dengan menggunakan semen Portland mempunyai berat 2513,25 kg untuk setiap kubikasi beton. Berbeda dengan beton konvensional, air yang digunakan untuk pembuatan beton geopolimer ( $130,81 \text{ kg/m}^3$ ) digunakan sebagai pelarut aktivator. Kuat tekan beton geopolimer sangat tergantung dari konsentrasi molaritas NaOH. Semakin tinggi molaritas yang digunakan maka kuat tekan beton geopolimer akan semakin tinggi pula.

Berdasarkan hasil uji tekan silinder pada Tabel 3, kuat tekan beton geopolimer lebih rendah dari beton dengan menggunakan semen Portland pada umur lebih dari 28 hari.



(a) grafik kuat tekan

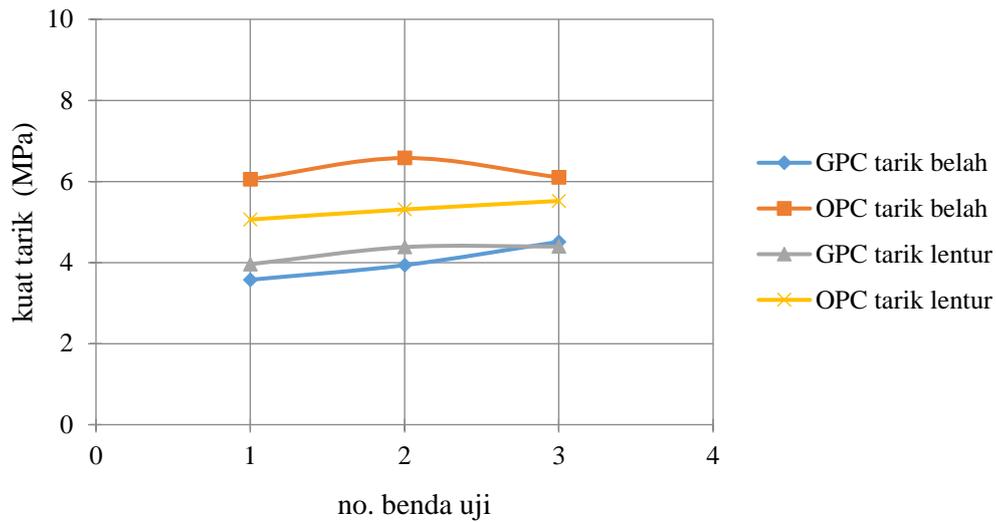


(b) grafik kuat tarik belah

**Gambar 5.** Perbandingan kuat tekan dan kuat tarik belah antara beton geopolimer (GPC) dan beton semen Portland (OPC)

Berdasarkan Gambar 5a, kuat tekan beton geopolimer 22% lebih rendah dibandingkan beton semen Portland dan kuat tarik belah beton geopolimer 33% lebih rendah

dibandingkan beton semen Portland. Bila hasil uji kuat tarik belah dibandingkan dengan hasil uji kuat tarik lentur, maka hasilnya dapat dilihat dalam Gambar 6.



**Gambar 6.** Perbandingan hasil uji kuat belah dengan kuat tarik lentur pada beton geopolimer (GPC) dan beton semen Portland (OPC)

Kuat tarik lentur dilakukan dengan cara uji lentur balok berukuran 150 mm x 150 mm x 600 mm. Untuk mengetahui lentur murni balok, dilakukan uji beban dengan dua titik pembebanan terpusat. Nilai rata-rata kuat tarik lentur beton geopolimer dan beton semen adalah 4,245 MPa dan 5,297 MPa. Berdasarkan Gambar 6, kuat tarik belah dan tarik lentur rata-rata beton geopolimer mempunyai nilai yang relatif sama ( $\cong 4$  MPa).

Untuk struktur balok bertulang beton geopolimer dan beton semen dilakukan uji beban untuk mengetahui kapasitas dari masing-masing balok tersebut. Kapasitas momen bergantung pada mutu beton dan tulangan secara teoritis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (4) sampai dengan persamaan (7). Besarnya kapasitas momen masing-masing penampang balok beton geopolimer dan beton semen ditunjukkan dalam Tabel 4.

**Tabel 4.** Hasil analisis momen kapasitas penampang dan lendutan struktur balok beton bertulang

No.	Uraian	Geopolimer	Semen OPC	Satuan
1	Berat beton $\gamma$	2500	2100	kg/m <sup>3</sup>
2	Luas penampang balok $A_b$	0,05	0,05	m <sup>2</sup>
3	Berat sendiri beton $q$	131,25	110,25	kg/m'
4	Bentang balok (L)	4	4	m
5	Lebar balok (b)	150	150	mm
6	Tinggi balok (h)	350	350	mm
7	Diameter tulangan tarik	16	16	mm
8	Luas tulangan tarik $A_s$	1005,31	1005,31	mm <sup>2</sup>
	Diameter sengkang $\phi$	8	8	mm
9	Tegangan leleh baja tulangan $f_s$	400	400	MPa
10	Tegangan beton $f_c'$	35,75	44,59	MPa
11	Tebal selimut beton (cover) $c$	20	20	mm
12	Gaya tarik yang diberikan tulangan $C_s$	402123,86	402123,86	N
13	Gaya tekan yang diberikan beton $C_c$	402123,86	402123,86	N
14	Jarak tegangan tekan ekivalen thd garis netral (a)	88,22	70,73	mm

15	Jarak tulangan thd serat tekan beton ( $d$ )	314	314	mm
16	Momen kapasitas balok ( $M_{kap}$ )	108528940,64	112045502,4	N.mm
17	Gaya maksimum yang dapat dipikul balok $P_{maks}$	141271,75	146509,86	N
18	Modulus elastisitas beton E	28281,29	31584,93	MPa
19	Momen inersia penampang balok	535937500	535937500	mm <sup>4</sup>
20	Lendutan maksimum akibat beban merata $q$ ( $\delta_1$ )	0,006	0,005	mm
21	Lendutan akibat beban terpusat $P/2$ di lokasi ( $\delta_2$ )	11,36	10,55	mm
22	Total lendutan	11,365	10,553	mm

Dari Tabel 4 momen kapasitas yang dapat dipikul oleh struktur balok beton geopolimer sebesar 108528940,64 N.mm (atau 108,53 kN.m) hampir sama dengan beton yang menggunakan semen Portland (112045502,4 N.mm atau 112,04 kN.m). Sehingga gaya maksimum yang dapat dipikul struktur balok

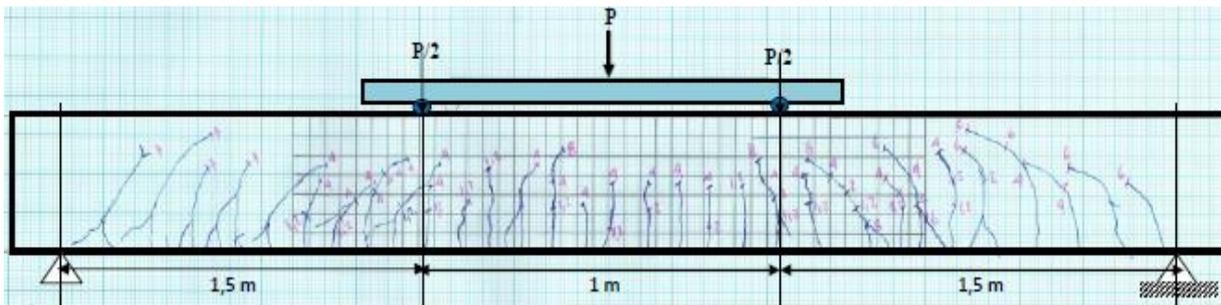
beton geopolimer sampai mencapai batas retak adalah 141271,75 N (atau 141,27 kN) dan untuk beton semen Portland sebesar 146509,86 N (atau 146,51 kN). Untuk uji lentur struktur balok beton bertulang ditunjukkan dalam Gambar 7.



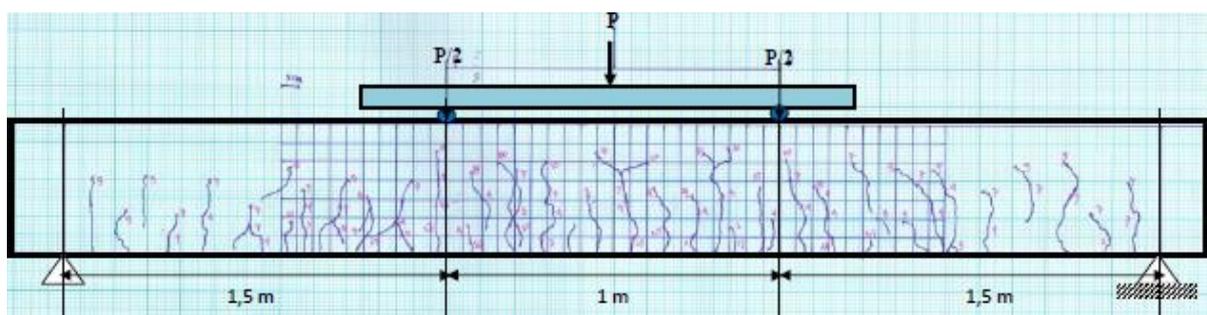
**Gambar 7.** Uji lentur struktur balok beton bertulang

Penampang beton bertulang dibuat dengan tulangan tarik, sedemikian sehingga keretakan terjadi di tengah bentang (pada momen maksimum) dan dihindari adanya keretakan akibat geser dekat tumpuan. Apabila beban bertambah terus, maka retak-retak di tengah bentang bertambah dan retak awal yang sudah terjadi semakin lebar dan semakin panjang menuju sumbu netral penampang. Hal ini bersamaan dengan semakin besarnya lendutan di tengah bentang. Besarnya momen

maksimal adalah besarnya momen akibat beban dimana pada balok terjadi keruntuhan di daerah tarik. Pola retak yang terjadi pada balok ditunjukkan dalam Gambar 8 untuk beton geopolimer dan Gambar 9 untuk beton semen Portland. Keduanya memperlihatkan tipikal retak akibat pembebanan lentur. Berdasarkan hasil pengukuran uji lentur laboratorium diperoleh data sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 5.



Gambar 8. Pola retak struktur balok beton bertulang geopolimer



Gambar 9. Pola retak struktur balok beton bertulang semen Portland

Tabel 5. Hasil pengujian laboratorium untuk struktur balok beton bertulang

No.	Identifikasi Benda Uji	Pembebanan pada kondisi retak	
		Beban (kN)	Defleksi (mm)
1	Balok 1 beton semen Portland	18,59	2,26
2	Balok 2 beton semen Portland	19,41	2,52
3	Balok 1 beton geopolimer	20,34	2,32
4	Balok 2 beton geopolimer	20,16	2,60

Besarnya lendutan maksimum yang terjadi akibat beban merata ( $q$ ) dan beban terpusat ( $P$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (8).

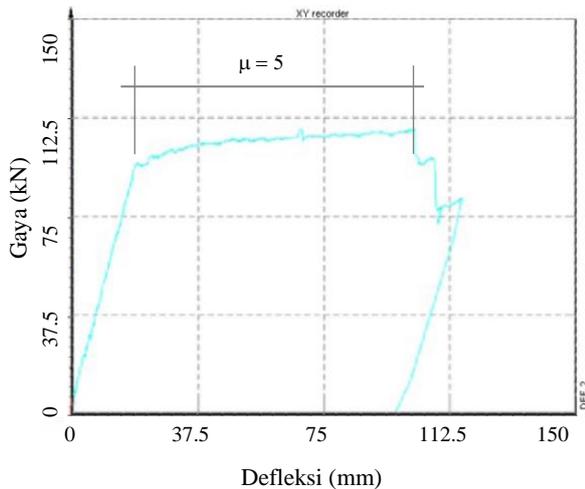
$$\delta = \frac{5}{384} q \frac{L^4}{EI} + \frac{Pa}{48EI} (3L^2 - 4a^2) \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- $q$  : berat balok per meter panjang ( $N/m^2$ );
- $P$  : beban terpusat (N);
- $E$  : modulus elastisitas beton (MPa);
- $I$  : momen inersia penampang beton ( $mm^4$ )
- $L$  : jarak antar perletakan (mm)
- $a$  : jarak dari beban  $P/2$  ke perletakan (m).

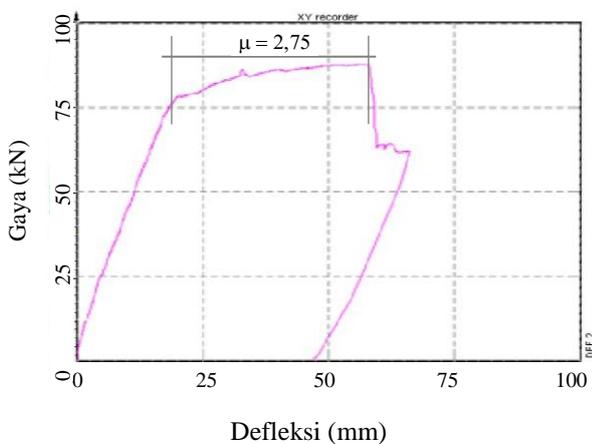
Berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh dari persamaan (8) diperoleh besarnya lendutan maksimum yang dapat dipikul oleh struktur balok beton bertulang geopolimer dan semen Portland berturut-turut sebesar 11,365 mm dan 10,553 mm. Lendutan yang dapat ditahan beton geopolimer sedikit lebih besar dibanding dengan beton semen Portland. Hal ini disebabkan karena berat jenis beton geopolimer lebih besar namun memiliki modulus elastisitas yang lebih kecil dibandingkan dengan beton semen Portland.

Hasil pengujian lentur dalam bentuk beban-defleksi untuk struktur beton geopolimer dan beton semen Portland dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



**Gambar 10.** Grafik hasil pengujian struktur balok beton bertulang semen Portland

Berdasarkan Gambar 10, beban runtuh struktur balok beton bertulang yang menggunakan semen Portland mencapai 109,2 kN. Perbandingan daktilitas berdasarkan lendutan pada saat putus terhadap lendutan saat leleh pertama adalah sebesar 5 untuk beton semen Portland.



**Gambar 11.** Grafik hasil pengujian struktur balok beton bertulang geopolimer

Pada struktur balok beton geopolimer dari Gambar 11, gaya runtuh dicapai pada 87,5 kN. Perbandingan lendutan pada saat putus terhadap lendutan saat leleh adalah 2,75. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perilaku struktur balok beton bertulang konvensional lebih daktil dibandingkan dengan balok beton bertulang geopolimer.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Beton tanpa semen Portland atau yang dikenal dengan istilah beton geopolimer dapat digunakan sebagai beton struktural. Berbeda dengan beton konvensional pada umumnya, proses reaksi beton geopolimer menggunakan larutan aktivator yang berfungsi sebagai penyusun pasta. Penggunaan 100% abu terbang sebagai pengganti semen menjadikan beton geopolimer sebagai beton yang ramah lingkungan. Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan di laboratorium, tingkat konsentrasi dari larutan aktivator sangat mempengaruhi kekuatan beton geopolimer. Dari beberapa variasi konsentrasi larutan aktivator 8 M, 10 M, dan 14 M yang digunakan, konsentrasi optimum dicapai pada tingkat molaritas 14 Molar. Semakin tinggi tingkat molaritas aktivator yang digunakan, maka kuat tekan beton geopolimer akan semakin tinggi pula. Beton geopolimer dapat digunakan sebagai beton struktural. Dari percobaan yang sudah dilakukan, untuk struktur balok beton geopolimer mempunyai kapasitas lentur yang hampir sama dengan beton konvensional (beton dengan 100% semen Portland). Jika dibandingkan terhadap hasil perhitungan teoritis, terdapat deviasi nilai kekuatan struktur balok yang diuji. Kapasitas beban yang dipikul oleh struktur balok lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis. Untuk balok beton geopolimer, kapasitas beban yang diperoleh dari hasil uji sebesar 87,5 kN dan berdasarkan hasil perhitungan teoritis adalah 141,27 kN (nilai deviasi 38%). Kemudian, untuk struktur balok beton konvensional, kapasitas beban yang dipikul dari hasil uji sebesar 109,2 kN dan berdasarkan hasil teoritis 146,51 kN (nilai deviasi 25%). Perbedaan nilai deviasi antara hasil uji dengan perhitungan teoritis dipengaruhi oleh asumsi mutu bahan dalam perhitungan teoritis yang bervariasi dalam pembuatan prototipe laboratorium.

### Saran

Proses kimia pada saat pencampuran beton geopolimer berlangsung sangat cepat, sehingga penggunaan beton geopolimer sangat sulit untuk dapat diterapkan di lapangan. Untuk itu diperlukan suatu bahan tambah yang dapat memperlambat terjadinya proses kimia

tersebut. Disamping itu perlu penelitian lebih lanjut untuk mengetahui konsentrasi larutan aktivator yang paling optimum agar dapat meningkatkan nilai kuat tekan beton geopolimer.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Januarti Jaya Ekaputri, Ph.D sebagai narasumber bidang material khususnya beton geopolimer dan Bapak Setyo Hardono, ST., MT. yang sudah memberikan dukungan atas terlaksananya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Ibu Khasuna Nur'aini, ST. M. Eng dan semua teman-teman laboratorium yang telah membantu kegiatan penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute (ACI). 2007. *Load Tests of Concrete Structures : Methods, Magnitude, Protocols, and Acceptance Criteria*. ACI 437.1R-07. Michigan : ACI.
- Anggie, Adityo Aer, Marthin D. J. Sumajouw, Ronny E. Pandaleke. 2014. Pengaruh Variasi Kadar Superplasticizer Terhadap Nilai Slump Beton Geopolimer. *Jurnal Sipil Statik* 2 (6) : 283-291.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. SNI 1974 : 2011. Jakarta : BSN.
- , 2014. *Metode Uji Kekuatan Tarik Belah Spesimen Beton Silinder*. SNI 2491 : 2014. Jakarta : BSN.
- , 2014. *Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah Atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton*. SNI 2460 : 2014. Jakarta : BSN.
- , 2015. *Semen Portland*. SNI 2049 : 2015. Jakarta : BSN.
- Davidovits. 1994. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. *Properties of Geopolymer Cements*. Kiev : Kiev State Technical University.
- Ekaputri, J.J. 2013. Sodium Sebagai Aktivator Fly Ash, Trass, dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil (Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil)* 20 (1) : 1-10.
- Ghais, Afaf Abadi, Duaa Ahmed, Ethar Siddig, Isra Elsadig, and Samah Albager. 2014. Performance of Concrete with Fly Ash and Kaolin Inclusion. *International Journal of Geosciences* 5 (12) : 1445-1450.
- Kurda, Rawaz, Jose D. Silvestre, and Jorge de Brito. 2018. Toxicity and Environmental and Economic Performance of Fly Ash and Recycled Concrete Aggregates Use in Concrete. *Helion Elsevier* 4(4):1-45.
- Li, Zongjin, Zhu Ding, and Yunseng Zhang. 2004. Development of Sustainable Cementitious Materials. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. Ames : Center for Transportation Research and Education Iowa State University.
- Madhavi, L. Swamy Raju , Deepak Mathur. 2014. Durabilty and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete. *Journal of Civil Engineering Research* 4(2A): 7-11.
- Indonesia. 1999. *Peraturan Pemerintah No. 85 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Jakarta : Sekretariat Negara.
- Pusat Litbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan). 2017. *Model Fisik inovasi Beton Sedikit Semen Portland dan tanpa semen Portland untuk Aplikasi Infrastruktur di Indonesia*. Laporan Internal. Bandung : [s.n].
- Risdanareni, Puput, Triwulan, dan Januarti Jaya Ekaputri. 2014. Pengaruh Molaritas Aktivator Alkalin Terhadap Kuat Mekanik Beton Geopolimer dengan Tras Sebagai Pengisi. *Seminar Nasional X – 2014*. Surabaya : Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh November.
- Salain, Sutarja, dan Eryantha. 2014. Kuat Tekan Beton yang Menggunakan *Fly ash* sebagai Pengganti Sebagian Semen Portland dan Agregat Kasar Batu Kapur Kristalin. *Konferensi Nasional Teknik Sipil* 8. Bandung : Institut Teknologi Nasional.
- Takapente, Giano N.O., Steenie E. Wallah, H. Manalip. 2018. Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Vulkanik. *Jurnal Sipil Statik* 6(9) : 657-664