

KUAT TEKAN DAN KUAT LENTUR BETON *GEPOLIMER FLY ASH BOTTOM ASH (FABA) HYBRID VARIASI EXTRA WATER/FABA*

Amsal Anwary¹⁾, Monita Olivia¹⁾, Iskandar Romey Sitompul¹⁾

¹⁾ Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Jl. HR. Soebrantas Km 12,5 Pekanbaru, Kode 28293

Email: amsal.anwary6007@student.unri.ac.id

ABSTRACT

Geopolymers are an alternative cement replacement, made from industrial waste that is rich in silica and alumina, such as fly ash bottom ash. The geopolymerisation bond can be activated by the activator solution and the curing system at high temperatures. This study utilizes fly ash bottom ash as a geopolymer material and uses an innovative ambient curing ease application in the field with additional PCC. This study aims to study the compressive strength and flexural strength of hybrid geopolymer concrete after 28 days of curing with variations of extra water/FABA 0.20 and 0.23. The test results show that the compressive strength of the extra water/FABA variation of 0.23 has the highest strength value of 15,56 MPa. While the compressive strength of the extra water /FABA variation of 0.20 has a compressive strength value of 14,62 MPa. The flexural strength value of the extra water/FABA variation of 0,23 has the highest value of 3,08 MPa. While the flexural strength value of the hybrid geopolymer concrete variation of extra water/FABA 0,20 is 2,81 MPa.

Keywords : hybrid geopolymer concrete, fly ash bottom ash, PCC, extra water/FABA.

A. PENDAHULUAN

Penggunaan semen Portland yang semakin meningkat setiap tahunnya, mengakibatkan meningkatnya industri semen Portland di dunia. Dalam setiap produksi satu ton semen Portland, akan dihasilkan sekitar satu ton gas CO₂ yang terlepas ke atmosfer (Kasyanto, 2012). Data tahun 1995, menunjukkan jumlah produksi semen Portland di dunia tercatat 1,6 miliar ton, hal ini berarti telah menyumbang CO₂ di atmosfer sejumlah 1,6 miliar ton (Hardjito, 2001).

Di sisi lain industri pembangkit listrik berbahan bakar batu bara di seluruh wilayah Indonesia menghasilkan limbah pembakaran seperti *Fly Ash Bottom Ash (FABA)* yang belum dimanfaatkan dengan maksimal. Secara faktual FABA memiliki potensi untuk menggantikan semen Portland sebagai bahan utama beton geopolimer, sehingga mampu dijadikan alternatif dalam pemanfaatan limbah batu bara.

Penelitian Bocullo et al, (2017) menunjukkan beton geopolimer dengan penambahan semen OPC mampu meningkatkan kuat lentur beton geopolimer *hybrid* dengan perawatan pada suhu ruang dai umur 14 hingga 28 hari sebesar 2,26 MPa dari 1,67 MPa. Penelitian lainnya dilakukan oleh Novianti, Olivia, dan Sitompul, (2019) mengenai beton geopolimer dengan penambahan semen PCC, hasil yang didapat menunjukkan beton geopolimer mampu dilakukan *curing* pada suhu ruang sehingga dapat diterapkan tanpa perlu *curing* suhu tinggi.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer dengan menggunakan FABA yang berasal dari PLTU Ombilin Sumatera Barat dengan penambahan semen PCC dengan variasi *extra water/FABA* 0,2 dan 0,23.

B. TINJAUAN PUSTAKA

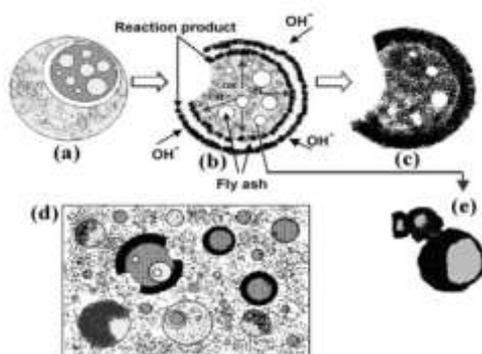
B.1 Beton

Beton merupakan campuran antara semen Portland atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat (SNI 03-2847, 2013).

Beton memiliki beberapa sifat mekanik di antaranya kuat tekan dan kuat lentur. Kuat tekan beton umumnya memiliki kekuatan lebih besar dibandingkan kuat tariknya, yang perbedaannya berkisar 10%-15% dari kuat tarik beton (Paat, Wallah, dan Winda, 2014).

B.2 Beton Geopolimer

Istilah geopolimer pertama kali dikemukakan oleh Davidovits pada tahun 1994. Larutan alkali dapat digunakan untuk mereaksikan aluminium (Al) dan silikon (Si) yang terdapat pada material hasil buangan industri seperti abu terbang, sehingga dapat digunakan menjadi *binder* karena memiliki sifat seperti semen. Reaksi kimia yang terjadi akibat pencampuran material tersebut termasuk dalam proses polimerisasi sehingga disebut geopolimer (Hardjito, dan Rangan, 2005).



Gambar 1. Skema Reaksi Larutan Alkali dengan Abu Terbang

(Fernández-Jiménez, Palomo, dan Criado 2005)

Fernández-Jiménez, Palomo, dan Criado, tahun 2005 menjelaskan mekanisme geopolimerisasi terdiri dari beberapa tahapan. Proses pemutusan

partikel abu terbang oleh ion hidroksida OH^- dan pengikatan polimerisasi. Pada tahap pemutusan partikel abu terbang diawali dengan reaksi kimia ion OH^- dari larutan alkali aktivator ke permukaan abu terbang. Ion OH^- hasil dari larutan alkali aktivator bereaksi melalui permukaan abu terbang seperti Gambar 1(a) dan 1(b). Kemudian dilanjutkan dengan reaksi OH^- ke arah dalam maupun luar sehingga menghasilkan suatu partikel abu terbang seperti pada Gambar 1(c). Pada saat yang sama terjadi reaksi yang tidak sempurna yang diwarnai dengan warna yang cerah seperti pada Gambar 1(d). Sedangkan untuk partikel dengan reaksi yang sempurna ditandai dengan warna yang gelap seperti pada Gambar 1(e). Sehingga tidak semua partikel dari abu terbang dapat bereaksi semua dengan larutan aktivator.

Beton geopolimer terbentuk melalui reaksi kimia. Sehingga jenis aktivator yang digunakan harus sesuai dengan senyawa yang terkandung dalam abu terbang dan komposisi yang digunakan harus tepat sehingga reaksi kimia dapat terjadi dengan baik. Aktivator yang umum digunakan adalah sodium hidroksida (NaOH) 8 M sampai 14 M dan sodium silikat (Na_2SiO_3) dengan perbandingan antara 0,4 sampai 0,25 (Rangan, dan Hardjito, 2005).

B.3 Beton Geopolimer Hybrid

Beton geopolimer *hybrid* merupakan beton dengan proporsi semen Portland yang rendah, yaitu lebih kecil dari 30% dari total berat abu terbang dan proporsi yang tinggi dari bahan aluminosilikat seperti abu terbang.

Beton geopolimer dan beton geopolimer *hybrid* memiliki perbedaan terletak pada adanya penambahan semen Portland. Partikel beton geopolimer *hybrid* lebih reaktif dibandingkan dengan beton geopolimer, dikarenakan adanya penambahan semen Portland (Garcia-Lodeiro et al. 2016).

Dalam pembentukan beton, geopolimer *hybrid* menghasilkan beberapa produk hasil hidrasi. Produk hidrasi seperti

kalsium silikat hidrat (CSH) hasil dari hidrasi OPC dengan air, natrium aluminosilikat hidrat (NASH) yang merupakan hasil dari alkali aktivator, kalsium aluminosilikat hidrat (KAS) serta (N, C) *gel-ASH* yang terbentuk pada *binder hybrid* tergantung pada rasio dari silika dan alumina dalam campuran *binder hybrid* (Al-Kutti, Nasir, dan Johari, 2017). Selain itu, beton geopolimer *hybrid* juga menghasilkan produk berupa kalsium aluminat silikat hidrat (CASH). Pada beton geopolimer *hybrid*, CASH berfungsi untuk beton geopolimer mampu mengeras tanpa suhu tinggi (Giri, Olivia, dan Sitompul, 2020).

B.4 Material Penyusun Beton Geopolimer Hybrid

B.4.1 Agregat

Menurut Tambingon, Sumajouw, dan Wallah, tahun 2018 menyatakan bahwa agregat halus berfungsi sebagai bahan pengisi, dikarenakan ukurannya yang lebih kecil dibandingkan agregat kasar. Agregat kasar mempengaruhi kekuatan akhir beton dan daya tahan beton akibat adanya rongga-rongga kosong sehingga memerlukan agregat halus untuk mengisi rongga tersebut.

B.4.2 Fly Ash Bottom Ash (FABA)

Fly ash pada FABA merupakan salah satu bahan yang memiliki potensi pengganti semen Portland dikarenakan memiliki partikel yang lebih halus dari semen Portland (Sebayang, 2010). Penambahan air dan aktivator akan mengakibatkan adanya reaksi kimia antara oksida silika yang dikandung oleh *fly ash* dengan sodium silikat dan sodium hidroksida pada larutan aktivator sehingga terjadi reaksi polimerisasi (Kasyanto, 2012).

Dalam sistem CFB, *bottom ash* adalah campuran antara abu batu bara, pasir kuarsa dan pecahan-pecahan dinding *furnace* yang terkikis selama proses pembakaran berlangsung (Winarno, Muhammad, dan Wibowo, 2019).

B.4.3 Semen Portland

Semen Portland adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Menurut ASTM C 150 tahun 1985, semen Portland didefinisikan sebagai semen hidrolik yang dihasilkan dengan menggiling *klinker* yang terdiri dari kalsium silikat hidrolik. Fungsi utama semen adalah mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara diantara butiran agregat.

B.4.4 Air

Menurut Tjokrodimuljo (1996) untuk bereaksi dengan semen, air yang diperlukan hanya sekitar 25% dari berat semen, namun dalam kenyataannya nilai *fas* (faktor air semen) yang dipakai sulit kurang dari 0,35 karena beton yang mempunyai proporsi air yang sangat kecil menjadi kering dan sukar dipadatkan. Oleh karena itu dibutuhkan tambahan air untuk menjadi pelumas campuran agar mudah dikerjakan.

B.4.5 Larutan Aktivator

Beton geopolimer menggunakan larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH) sebagai larutan aktivator. Na_2SiO_3 berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Sedangkan NaOH berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dihasilkan ikatan polimerisasi yang kuat (Kasyanto, 2012). Kuat tekan geopolimer sangat tergantung pada sifat larutan aktivator dan material pozzolan yang digunakan pada campuran beton (Amin, dan Suharto, 2017).

B.4.6 Superplasticizer

Superplasticizer sebagai bahan tambah memiliki fungsi untuk menghasilkan beton yang mengalir tanpa terjadinya pemisah pada beton dengan jumlah air yang besar (Utami, Herbudiman, dan Irawan, 2017). Penggunaan *superplasticizer* berguna

untuk mencetak beton di tempat-tempat yang sulit seperti tempat pada penulangan yang rapat, sehingga tidak terjadi segregasi pada bagian-bagian yang sulit dijangkau.

B.5 Beton Dengan *Curing* Suhu Ruang

Perawatan beton (*curing*) adalah prosedur setelah pengecoran yang dilakukan untuk menjaga beton selama proses hidrasi berlangsung. Pada saat semen bercampur dengan air terjadi reaksi kimia yang disebut dengan hidrasi. Saat hidrasi berlangsung kehilangan air akibat penguapan harus dihindari karena dapat menyebabkan proses hidrasi terhenti, hal ini dapat mengakibatkan beton menyusut dan menjadi retak (Wallah, Tamboto, dan Pandaleke, 2013).

Perawatan beton sangat dipengaruhi oleh suhu dan kelembaban dari beton itu sendiri, oleh karena itu perawatan beton tidak hanya mempengaruhi kekuatan beton tapi juga dapat mempengaruhi ketahanan beton. Perawatan beton dilakukan dalam keadaan basah, yaitu dengan perendaman dalam air kapur jenuh atau dengan ditutupi dengan kain basah (SNI 03-4810, 1998). Penggunaan metode perawatan yang efektif bergantung pada jenis material yang digunakan, jenis konstruksi, dan pemanfaatan beton yang diharapkan.

Aristianti (2020) mengemukakan Benda dengan *curing* suhu ruang mengalami penurunan kuat tekan yang lebih dominan dibandingkan dengan variasi curing disiram. Hal ini disebabkan permukaan beton yang telah dilepas dari cetakan tidak lagi lembab, sehingga udara panas akan terjadi proses penguapan air dari permukaan beton segar, sampai air dari dalam beton segar mengalir keluar dan beton segar kehilangan air untuk panas hidrasi.

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang dilakukan ialah pengujian agregat kasar dan halus yang berasal dari daerah PT. Mitra Beton, Pekanbaru. Selain itu

dilakukan pengujian kandungan FABA yang dilakukan di PT. Sucofindo cabang Pekanbaru.

C.2 Perencanaan Dan Pembuatan benda Uji

Benda uji dibuat menjadi dua variasi campuran yakni beton PCC yang merupakan beton kontrol dengan mutu 20 MPa dan beton geopolimer *hybrid* dengan komposisi PCC 15%, Molaritas NaOH 12 M, perbandingan natrium silikat dan natrium hidroksida (Ms) 2,5, dan extra water/FABA 0,20.

Benda uji yang dibuat pada penelitian ini adalah silinder berukuran 100x210 mm sebanyak 3 buah buah untuk pengujian kuat tekan di setiap variasi *extra water/FABA* dan balok berukuran 150x150x600 mm sebanyak 1 buah untuk pengujian kuat lentur di variasi *extra water/FABA* 0,23. *Extra water/FABA* sendiri merupakan perbandingan antara air yang yang ditambahkan dengan total FABA yang digunakan dalam campuran beton geopolimer *hybrid*.

C.3 Perawatan Benda Uji

Perawat benda uji (*curing*) dilakukan pada suhu ruang. Setelah dilakukan *rest period* selama 3 hari. *Curing* pada suhu ruang dilakukan selama 28 hari.

C.4 Pengujian Benda Uji

C.4.1 Kuat Tekan

Kuat tekan beton merupakan besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan (SNI 03-2974, 1990) seperti pada Gambar 2. Kuat tekan beton dapat dihitung dengan persamaan 1 berikut.

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

Keterangan:

f'_c : kuat tekan beton (MPa)

P : beban tekan (N)

A : luas permukaan benda uji (mm²)



Gambar 2. Pengujian Kuat Tekan

C.4.2 Kuat Lentur

Berdasarkan SNI 4431 (2011) kuat lentur beton merupakan kemampuan suatu balok beton yang diletakan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus benda uji sampai mengalami patah seperti pada Gambar 3. Kuat lentur dapat dihitung dengan persamaan 2 dan 3 berikut.

1. bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah)

$$f_r = \frac{PL}{bh^2} \quad (2)$$

2. bidang patah terjadi pada bagian tarik di luar tengah bentang (<5% bentang L)

$$f_r = \frac{Pa}{bh^2} \quad (3)$$

Keterangan:

f_r : *modulus of rupture* (MPa)

P : beban maksimum (N)

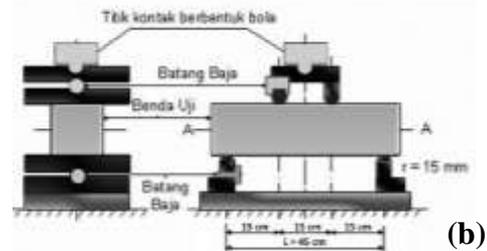
L : jarak garis perletakan (mm)

b : lebar *specimen* (mm)

h : tinggi *specimen* (mm)

a : jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik *specimen* (mm)

catatan: Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah) dan jarak antara titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak digunakan.



Gambar 3. Pengujian Kuat Lentur (SNI 4431, 2011)

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Berdasarkan Tabel 1 diketahui bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki berat jenis SSD sebesar 2,56 dengan *absorption* sebesar 1,63, berat jenis ini lah yang digunakan dalam perhitungan. Rendahnya nilai *absorpsi* akan berpengaruh terhadap gaya lekat antar agregat dan pasta. Modulus kehalusan yang digunakan sebesar 6,81. Kadar keausan agregat kasar sebesar 40,26%. Berat volume yang diuji pada agregat kasar yaitu kondisi gembur dan padat dengan masing-masing sebesar 1,334 dan 1,493. Nilai kadar air tidak memenuhi standar yang digunakan yakni sebesar 0,106%, hal ini terjadi dikarenakan dilakukannya penjemuran agregat kasar.

Tabel 1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji	Standar Spesifikasi
Berat jenis (gr/cm^3)		
a. <i>Apparent specific gravity</i>	2,63	2,50 – 2,70
b. <i>Bulk specific gravity (dry)</i>	2,52	2,50 – 2,70

Tabel 1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar (Lanjutan)

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji	Standar Spesifikasi
c. <i>Bulk specific gravity</i> (SSD)	2,56	2,50 – 2,70
d. <i>Absorption</i> (%)	1,63	2,00 – 7,00
Kadar air	0,106	3,00 – 5,00
Keausan (%)	40,26	<40
Modulus kehalusan	6,81	6,00 – 7,10
Berat volume (gr/cm ³)		
a. Kondisi gembur	1,334	1,40 – 1,90
b. Kondisi padat	1,493	1,40 – 1,90

Tabel 2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Jenis Pemeriksaan	Hasil Uji	Standar Spesifikasi
Kadar lumpur	0,64	<5
Berat jenis (gr/cm ³)		
a. <i>Apparent specific gravity</i>	2,67	2,50 – 2,70
b. <i>Bulk specific gravity (dry)</i>	2,59	2,50 – 2,70
c. <i>Bulk specific gravity</i> (SSD)	2,62	2,50 – 2,70
d. <i>Absorption</i> (%)	1,16	2,00 – 7,00
Kadar air	0,02	3,00 – 5,00
Modulus kehalusan	2,98	1,50 – 3,80
Berat volume (gr/cm ³)		
a. Kondisi gembur	1,55	1,40 – 1,90
b. Kondisi padat	1,72	1,40 – 1,90
Kadar organik	2	<No. 3

Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa agregat halus yang digunakan memiliki kadar lumpur sebesar 0,64. Berat jenis SSD sebesar 2,62 dengan absorpsi sebesar 1,16. Rendahnya nilai absorpsi akan berpengaruh terhadap gaya lekat antar agregat dan pasta. Modulus kehalusan yang digunakan sebesar 2,98. Berat volume yang diuji pada agregat kasar yaitu kondisi gembur dan padat dengan masing-masing sebesar 1,551 dan 1,723. Kadar organik yang digunakan bernilai 2, sesuai dengan standar yang digunakan. Nilai kadar air tidak memenuhi standar yang digunakan yakni sebesar 0,02%, hal ini terjadi

dikarenakan dilakukannya penjemuran agregat halus.

D.2 Hasil Pengujian Fly Ash Bottom Ash (FABA)

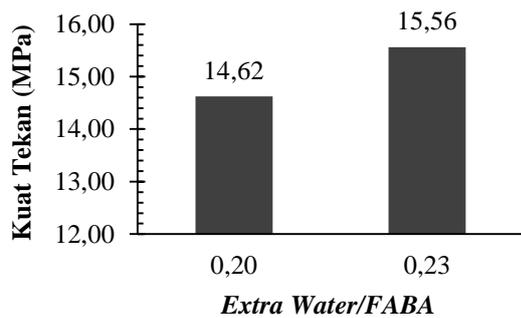
Tabel 3 Hasil Uji Analisa Fly Ash Bottom Ash (FABA)

Parameter Uji	Hasil Analisa (%)
K ₂ O	2,23
SiO ₃	59,25
Al ₂ O ₃	29,25
Fe ₂ O ₃	5,45
CaO	1,54
MgO	0,31
Na ₂ O	0,68
SO ₃	0,29
P ₂ O ₅	0,04
TiO ₂	0,83
MnO ₂	0,01

Pada Tabel 3 di atas dapat dilihat jumlah senyawa kimia yang sangat dominan pada FABA yang digunakan pada penelitian ini adalah SiO₃ (silika) dengan persentase hingga 59,25%, Al₂O₃ (alumina) sebesar 29,25 Fe₂O₃ (besi) memiliki kandungan sebesar 5,45%. Sedangkan untuk senyawa kimia lainnya memiliki persentase yang tidak lebih dari 5%. Adanya unsur senyawa silika, alumina dan besi yang tinggi pada material FABA yang digunakan, menunjukkan bahwa FABA tersebut mengandung sifat pozzolan. Sehingga FABA dapat digunakan sebagai material pembentuk beton.

D.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer *hybrid* berbentuk silinder berukuran 100x210 mm setelah dilakukan *curing* 28 hari pada suhu ruang dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.

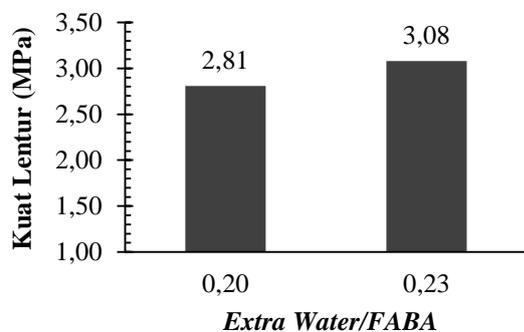


Gambar 4 Hasil Uji Kuat Tekan

Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan geopolimer *hybrid* yang didapat dengan menggunakan *Compression Test Machine* sebesar 14,62 MPa untuk *extra water/FABA* 0,20 dan 15,56 MPa *extra water/FABA* 0,23. Nilai kuat tekan beton geopolimer *hybrid* dengan *extra water/FABA* 0,23 memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai kuat tekan dengan menggunakan variasi *extra water/FABA* 0,20 dengan selisih 6,43%. Akan tetapi, Hasil tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan penelitian mengenai geopolimer *hybrid* yang dilakukan oleh Noviandi, Olivia, dan Sitompul, (2019) yang mendapatkan nilai kuat tekan sebesar 17,95 MPa dengan menggunakan *extra water/FABA* 0,23.

D.5 Hasil Pengujian Kuat Lentur

Hasil pengujian kuat lentur beton geopolimer *hybrid* setelah *curing* 28 hari pada suhu ruang dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5 Hasil Uji Kuat Lentur

Dari gambar 5 didapat nilai kuat lentur sebesar beton geopolimer *hybrid*

dengan *extra water/FABA* 0,23 memiliki nilai kuat lentur yang lebih besar dibandingkan variasi *extra water/FABA* 0,20 dengan selisih 9,61%. Nilai kuat lentur geopolimer *hybrid* yang didapat sebesar 3,08 MPa untuk *extra water/FABA* 0,23 dan 2,81 MPa *extra water/FABA* 0,20. Hasil ini masih di bawah standar nilai *flexural strength (Modulus rapture)* minimum di Indonesia yang dikemukakan oleh Suryawan (2009) yakni sebesar 4,42 MPa untuk keperluan struktur *rigid pavement*.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian sampel kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer *hybrid* dengan variasi *extra water/FABA* didapatkan kesimpulan nilai kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer *hybrid* dengan variasi *extra water/FABA* 0,23 mendapatkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan variasi *extra water/FABA* 0,20 dengan nilai kuat tekan sebesar 15,56 MPa dengan selisih 6,43% dan kuat lentur sebesar 3,08 Mpa dengan selisih 9,61%.

E.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penambahan waktu pengujian seperti pada 7 dan 14 hari, agar nilai perubahan kekuatan dapat terlihat perbandingannya.
2. Perlu dilakukan pengkajian beton geopolimer *hybrid* dengan variasi *extra water/FABA* dengan penambahan variasi untuk mendapatkan beton geopolimer *hybrid* tanpa adanya susut yang berlebihan.

Daftra Pustaka

Al-Kutti, W., Nasir, M., Johari, M., Azmi, M., Islam, A. B. M. S., Manda, A. A., & Blaisi, N. I. (2017). *An overview*

- and experimental study on hybrid binders containing date palm ash, fly ash, OPC and activator composites. *Construction and Building Materials*, 159, 567–577.
- Amin, M., & Suharto. (2017). Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basal Guna Menuju Lampung sejahtera. *Inovasi Pembangunan-Jurnal Kelitbangsan*, 05(01).
- Aristianti, R. (2020). Penggunaan *Electric Arc Furnace Slag* Pada Pembuatan Beton Kinerja Tinggi Dengan Perbedaan Perlakuan Perawatan. *Rekayasa Teknik Sipil*, 02, 1–4.
- ASTM C 150. (1985). *Standard Specification for Portland Cement*.
- Bocullo, V., Vaičiukynienė, D., Borg, R. P., & Briguglio, C. (2017). *Alkaline Activation of Hybrid Cements Binders Based on Industrial by-Products*. 2(19), 65–73.
- Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. *Saint-Quentin - France*, 19.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). *Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model*. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204–1209.
- Garcia-Lodeiro, I., Donatello, S., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, Á. (2016). *Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: A descriptive model*. *Materials*, 9(8).
- Giri, F. R., Olivia, M., & Sitompul, I. R. (2020). Pengaruh Variasi Penambahan NaOH Pada Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Dengan OPC Sebagai Tambah. *Jom FTEKNIK*, 7, 1–8.
- Hardjito, D. (2001). Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen. *Sinar Harapan*.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. *Research Report GC*, 94.
- Kasyanto, H. (2012). Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Dan Sodium Silikat. *Industrial Research Workshop and National Seminar*.
- Noviandi, R., Olivia, M., & Sitompul, I. R. (2019). Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Geopolimer Abu Terbang Hybrid Dengan Pencampuran *Potrland Composite Cement*. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*, 6(1).
- Paat, F. E. S., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Kuat Tarik Lentur Beton *Geopolymer* Berbasis Abu Terbang (FLY ASH). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7), 337–343.
- Rangan, B., & Hardjito, D. (2005). *Studies On Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. *Proc. 4th World ...*, (November). Retrieved from
- Sebayang, S. (2010). Pengaruh Kadar Abu Terbang Sebagai Pengganti Sejumlah Semen Pada Beton Alir Mutu Tinggi. *Jurnal Rekayasa*, 14(1).
- SNI 03-2847. (2013). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Bandung: Badan Standardisasi Indonesia*, 1–265.
- SNI 03-2974. (1990). Metode pengujian kuat tekan beton. *Standar Nasional Indonesia*.
- SNI 03-4810. (1998). Metode Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Lapangan. *Standar Nasional Indonesia*, 1–8.
- SNI 4431. (2011). Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan. *Standar Nasional Indonesia*.
- Suryawan, A. (2009). *Perkerasan Jalan Beton Semen Portland (Rigid Pavement)*. *Yogyakarta: Beta Offset Yogyakarta*.
- Tambingon, F. R., Sumajouw, M. D. J., & Wallah, S. E. (2018). Kuat Tekan Beton *Geopolymer* dengan Perawatan Temperatur Ruang. *Jurnal Sipil Statik*, 6(9), 641–648.

- Tjokrodimuljo, K. (1996). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Nafiri.
- Utami, R., Herbudiman, B., & Irawan, R. R. (2017). Efek Tipe *Superplasticizer* terhadap Sifat Beton Segar dan Beton Keras pada Beton Geopolimer Berbasis *Fly Ash*. *Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 3(1), 1–12.
- Walah, S. E., Tamboto, W. J., & Pandaleke, R. (2013). Pengaruh Variasi Suhu Pada Perawatan *Elevated Temperature* Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Sipil Statik*, 1(7), 473–478.
- Winarno, H., Muhammad, D., & Wibowo, Y. G. (2019). Pemanfaatan Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash Dari Pltu Sumsel-5 Sebagai Bahan Utama Pembuatan *Paving Block*. *Jurnal Teknik*, 11(1), 1067.