

KUAT TEKAN DAN POROSITAS BETON GEOPOLIMER *HYBRID* FABA DENGAN PENAMBAHAN SEMEN PCC DI AIR GAMBUT

Muhammad Ikrammullah¹⁾, Monita Olivia¹⁾, Gunawan Wibisono¹⁾.

¹⁾ Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya, JL. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email: muhammad.ikrammullah6140@student.unri.ac.id, monita.olivia@lecturer.unri.ac.id,

gunawan.wibisono@lecturer.unri.ac.id

ABSTRACT

Geopolymer hybrid concrete is formed from materials containing alumina and activated silica using an alkali activator with the addition of portland cement to produce heat of hydration, so as geopolymer concrete treatment can be carried out at room temperature. The purpose of this research to knowing durability of geopolymer hybrid FABA concrete with the addition of PCC after exposed to peat water for 0, 7, and 28 days. Control concrete with a design quality of 20 MPa. The activator solution used NaOH with molarity 12M and Na₂SiO₃ with a modulus ratio (Ms) of 2.5. The percentage added of PCC cement is 15% by weight of FABA. Results of the test showed that the compressive strength of PCC concrete increased 8.82%, while geopolymer hybrid concrete increased 6.88% until the age of 28 days cured in peat water. Moreover, the porosity of PCC concrete of PCC concrete decreased 3.01%, while geopolymer hybrid an increase 6.08% until the age of 28 days cured in peat water.

Keyword: peat water, geopolymer hybrid, concrete, compressive strength, porosity, fly ash and bottom ash.

A. PENDAHULUAN

A.1. Latar Belakang

Beton geopolimer pertama kali dipopulerkan oleh Davidovits pada tahun 1978 yang merupakan material konstruksi tahan panas serta material ramah lingkungan karena dalam pembuatannya dapat meminimalisirkan penggunaan semen *portland* sebagai perekat. Beton geopolimer tersusun atas material yang mengandung alumina

(Al₂SiO₃) dan silika (SiO₂) berkonsentrasi tinggi dengan mereaksikan dengan larutan alkali aktivator agar terjadi reaksi polimerisasi. Proses pembentukan beton geopolimer bersifat endotermis, sehingga membutuhkan suhu tinggi dalam perawatannya agar reaksi polimerisasi berlangsung dengan cepat, juga dapat meningkatkan kuat tekannya (Hardjito et al., 2008). Hal ini menjadikan beton

geopolimer sulit diterapkan di lapangan. Penelitian Tambington *et al.*, (2018) menunjukkan, hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari, beton geopolimer yang dirawat pada suhu ruang memiliki kuat tekan sebesar 21,79 MPa. Sedangkan beton geopolimer yang dirawat selama 24 jam pada suhu 60° C memiliki kuat tekan sebesar 32,65 MPa, dan pada suhu 90° C memiliki kuat tekan sebesar 42,32 MPa.

Penambahan semen *portland* dapat menghasilkan panas hidrasi pada campuran beton geopolimer (Mejía *et al.*, 2015), sehingga dapat membantu perawatan beton geopolimer pada suhu ruang. Campuran semen pada beton geopolimer dikenal dengan istilah beton geopolimer *hybrid*.

Provinsi Riau salah satu wilayah di Indonesia yang memiliki lahan gambut yang luas. Data pada tahun 2011 menunjukkan luas lahan gambut di Riau sebesar 3,86 juta hektar yang setara dengan 60% dari total luasan lahan gambut di Indonesia (Ritung & Sukarman, 2016). Besarnya lahan gambut ini menimbulkan potensi dalam pembangunan konstruksi yang berhubungan langsung dengan lahan gambut. Tanah gambut memiliki sifat asam yang tinggi karena mengandung

zat organik dan memiliki daya dukung tanah yang rendah (Agus, *et. al*, 2014).

Selain itu, lingkungan gambut yang memiliki sifat asam juga dapat merusak struktur beton dari semen *portland*. Kerusakan struktur beton dimulai dari sisi luar beton yang kontak langsung dengan air gambut, kemudian dalam rentang waktu yang lama akan menyebabkan kekuatan beton berkurang dan menurunkan durabilitas beton (Purba, 2007). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Olivia (2015), beton di lingkungan gambut dapat mengalami penurunan kekuatan tekan yang cukup signifikan, dimana penurunan kekuatan sebesar 38% dari umur 28 hingga 180 hari perendaman air gambut. Adapun salah satu cara untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan asam dapat menggunakan teknik beton geopolimer *hybrid*. Kandungan silika pada beton geopolimer dapat menahan kerusakan beton yang diakibatkan oleh serangan asam pada lingkungan gambut.

Konsumsi batubara setiap tahun selalu mengalami peningkatan. Menurut data Kementerian ESDM (2019) pada tahun 2018 penggunaan batubara mencapai hingga 115 juta ton selama setahun, nilai ini terus melonjak terhitung sejak tahun 2014 dan

diperkirakan akan terus meningkat setiap tahunnya. Batubara banyak digunakan sebagai salah satu sumber energi penghasil listrik melalui PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) melalui proses pembakaran. Pembakaran batubara menghasilkan limbah berupa abu dasar (*bottom ash*) dan gas emisi berbahaya bagi lingkungan meliputi abu terbang (*fly ash*), SO₂, NO₂, metana, CO dan CO₂ (Aryono, 2001).

Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 menjelaskan bahwa limbah hasil pembakaran batubara berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) merupakan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang dapat membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia. Sehingga, perlu dilakukan pengolahan sesuai dengan kaidah-kaidah dalam peraturan tersebut. Pengolahan yang dianjurkan dalam Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 dengan cara solidifikasi dimana dengan proses tersebut sifat B3 dalam material FABA akan menjadi stabil dan dapat dimanfaatkan sebagai produk yang aman bagi lingkungan dan kesehatan. Disamping itu, pemanfaatan limbah B3 dapat mengurangi potensi kerusakan lingkungan.

Berdasarkan hal tersebut, maka perlu dilakukan kajian . kuat tekan dan porositas beton geopolimer *hybrid* FABA (*fly ash and botoom ash*) dengan penambahan PCC (*Portlant Composite Cement*) yang terpapar air gambut. Pengujian tersebut dilakukan setelah beton geopolimer *hybrid* terpapar di air gambut. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi beton geopolimer *hybrid* FABA yang ramah lingkungan sebagai material konstruksi.

B. TINJAUAN PUSTAKA

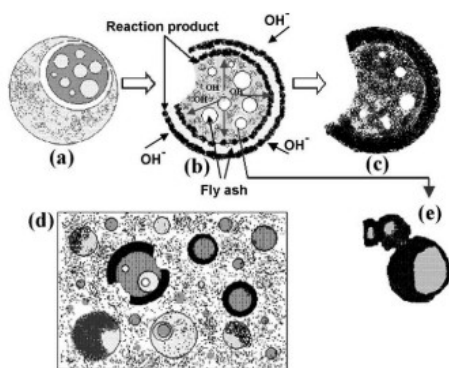
B.1 Beton Konvensional

Beton merupakan suatu produk yang dibuat menggunakan media penyemenan dari reaksi semen hidrolis dengan air. Menurut SNI 03-2847-2013, beton merupakan campuran antara semen *portland* atau semen hidrolis yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air dengan atau tanpa bahan campuran (*admixture*) yang membentuk massa padat.

B.2. Beton Geopolimer *Fly Ash and Bottom Ash* (FABA)

Mekanisme reaksi polimerisasi dapat dilihat pada Gambar 1. Menurut Fernández-Jiménez, *et al.* (2005), reaksi

dimulai dari pemutusan partikel abu terbang oleh ion OH^- dari larutan alkali aktivator ke permukaan abu terbang. Kemudian reaksi berlanjut ke bagian dalam dan bergerak keluar secara bersamaan hingga seluruh ataupun sebagian abu terbang bereaksi. Reaksi dari alkali aktivator berlanjut hingga menembus bagian partikel terkecil abu terbang. Selain itu, terbentuk pula lapisan penghambat dari bulatan-bulatan kecil yang tidak bereaksi dengan alkali. Lapisan ini mencegah terjadinya proses lanjutan abu terbang dengan alkali. Pada tahap akhir akan terbentuk susunan geopolimer yang terbentuk dari partikel abu terbang yang bereaksi sempurna dengan alkali aktivatornya, tetapi terdapat juga sebagian abu terbang yang tidak bereaksi.



Gambar 1. Reaksi Larutan Alkali Aktivator dengan Abu Terbang
(Fernández-Jiménez et al., 2005)

B.3 Bahan Penyusun Beton

Geopolimer *Hybrid*

B.3.1 Agregat

Terdapat dua macam jenis agregat yang digunakan dalam campuran beton, yaitu agregat halus dan agregat kasar yang didapatkan secara alami maupun buatan. Agregat halus adalah agregat yang memiliki ukuran butirannya lebih kecil dari 4,80 mm (*British Standard 882*) atau 4,75 mm (Standar ASTM C33). Sedangkan, agregat kasar adalah agregat yang memiliki ukuran butirannya lebih besar dari 4,80 mm (*British Standard 882*) atau 4,75 mm (Standar ASTM C33).

B.3.2 Air

Air memiliki peran yang penting dalam proses pembuatan beton. Air yang digunakan tidak boleh yang membahayakan proses hidrasi dan memiliki syarat sebagai air bersih. Air yang dicampurkan dengan semen akan bereaksi menghasilkan proses hidrasi sehingga membuat campuran tersebut menjadi keras, serta sebagai pelumas dalam campuran beton agar mudah dalam pengerjaannya.

B.3.3 Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Semen merupakan material halus yang berguna sebagai perekat antara

agregat halus dan agregat kasar. Semen *portland* dihasilkan dengan cara menggiling terak semen yang terdiri dari kalsium silikat dengan bahan tambahan lain (SNI 03-2847-2002). Bahan baku pembentuk semen pada umumnya terdiri dari tiga macam, yaitu kapur (CaO) dari batu kapur, Silika (SiO₂) dan Alumina (Al₂O₃) dari lempung.

Semen PCC (*portland composite cement*) merupakan turunan dari semen OPC (*ordinary composite cement*) yang bahan baku pembuatannya sama dengan semen OPC, akan tetapi pada semen PCC ditambahkan zat aditif selain gypsum seperti *lime stone*, *fly ash* dan *trass*. Ketiga zat aditif tersebut mempunyai kontribusi yang sangat penting sehingga semen PCC mempunyai kualitas yang lebih baik dari semen OPC (Hariawan, 2011).

B.3.4 Larutan Alkali Aktivator

Beton geopolimer membutuhkan pereaksi agar terjadi reaksi polimerisasi. Larutan alkali yang digunakan adalah kombinasi sodium hidroksida (NaOH) sebagai mempercepat reaksi polimerisasi dan larutan sodium silikat (Na₂SiO₃) sebagai pereaksi unsur-unsur silika dan alumina yang terkandung dalam FABA, sehingga menghasilkan

ikatan polimer yang kuat (Kasyanto, 2012).

B.3.5 Superplasticizer

Superplasticizer adalah bahan tambah (*admixture*) yang ditambahkan ke dalam campuran beton pada saat pengadukan dan atau saat pelaksanaan pengecoran. *Superplasticizer* dapat memperbaiki kinerja dari segi kekuatan dan meningkatkan kemudahan dalam pengadukan (*workability*). Akan tetapi, pemberian dosis *superplastisizer* yang lebih dari 1,5% dari berat binder dapat menyebabkan penundaan *setting time* yang lama sehingga campuran beton kehilangan kekuatan akhirnya (Dzikri & Firmansyah, 2018).

B.3.6 FABA (Fly Ash and Bottom Ash)

FABA merupakan dua jenis limbah hasil residu dari pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap. Dari pembakaran tersebut kadar *fly ash* yang dihasilkan sekitar 20% dan *bottom ash* sekitar 80%. Berdasarkan peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014, FABA termasuk kedalam limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang dapat berdampak buruk terhadap lingkungan dan kesehatan makhluk hidup.

B.4 Beton Geopolimer di Lingkungan Gambut

Lingkungan gambut memiliki sifat asam tinggi, nilai pH 3-5, sehingga dapat merusak logam-logam penyusun material konstruksi seperti beton yang akhirnya menurunkan kualitas material tersebut. Hal ini disebabkan oleh reaksi ion-ion sulfat dari asam gambut sehingga membuat panas hidrasi dari semen terganggu yang mengakibatkan beton mengalami pengeroposan (Zivica, 2006). Proses pengeroposan ditandai dengan terurainya kalsium (Ca) dari pasta semen, hal ini disebut *leaching*. Leaching tersebut memicu perubahan sifat mekanis dan durabilitas, yaitu kekuatan beton menurun dan porositas beton membesar yang menyebabkan beton keropos.

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material terdiri dari pengujian karakteristik kimia FABA, dilakukan di Balai Riset dan Standarisasi Industri Padang. Serta pengujian karakteristik sifat fisik agregat halus dan agregat kasar, dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Sipil Universitas Riau.

C.2 Perencanaan dan Pembuatan Benda Uji

Perencanaan campuran beton geopolimer *hybrid* FABA dilakukan dengan metode absolute volume yaitu menetapkan berat volume padat beton sebesar 2400 kg/m^3 sedangkan perencanaan campuran beton normal PCC sebagai beton kontrol menggunakan metode ACI dengan mutu rencana 20 MPa. Adapun komposisi campuran kedua jenis beton dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Campuran Beton

Material	Geopolimer <i>Hybrid</i> (kg/m^3)	Normal PCC (kg/m^3)
Semen	76,36	350,98
Agregat Halus	546,00	760,27
Agregat Kasar	1014,00	1027,62
Air	117,09	202,82
FABA	509,09	-
NaOH	94,55	-
Na_2SiO_3	236,4	-
<i>Superplasticizer</i> .	7,64	-

Jumlah benda uji beton yang dibuat sebanyak 18 buah. Terdiri dari 9 silinder 105x210 mm untuk pengujian kuat tekan, dan 9 silinder 105x105 mm untuk pengujian porositas. Pembuatan benda uji berupa beton geopolimer *hybrid* dimulai dengan membuat larutan pencampur berupa larutan alkali, air, dan *superplastisizer* sebesar 1,5% dari berat FABA. Pencampuran beton geopolimer

hybrid menggunakan bantuan mesin *concrete mixer*. Pengadukan beton geopolimer *hybrid* dilakukan secara bertahap. Tahap pertama mencampur agregat halus, agregat kasar beserta abu terbang hingga merata, kemudian menambahkan larutan pencampur hingga merata selama 5 menit. Selanjutnya, menambahkan semen PCC kemudian diaduk hingga merata selama 5 menit. Setelah tercampur merata beton geopolimer *hybrid* FABA dituang kedalam cetakan silinder dengan tiga lapisan, tiap lapisan di padatkan dengan alat pemadat sebanyak 25 kali pukulan.

C.3 Perawatan dan Perendaman di Air Gambut

Pengerasan beton geopolimer cenderung lambat dibawah suhu ruang (28°C) (Hardjito *et al.*, 2004). Sehingga, pada penelitian ini dilakukan *rest periode* selama 3 hari sebelum dibuka cetakannya.

Perawatan beton geopolimer *hybrid* ditempatkan pada suhu ruang. Sedangkan beton normal PCC direndam menggunakan air bersih. Perawatan benda uji dilakukan selama 28 hari.

C.4 Pengujian Benda Uji

Pengujian benda uji yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengujian kuat tekan beton setelah perendaman di air gambut selama 0, 7, dan 28 hari. Menurut SNI 1974:2011, kuat tekan beton dapat dihitung dengan Rumus 1 sebagai berikut:

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

dengan:

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang yang dibebani (mm^2)

2. Pengujian porositas beton setelah perendaman di air gambut selama 0, 7, dan 28 hari. Adapun nilai persentase yang didapatkan menunjukkan tingkat kepadatan pori pada suatu sampel beton. Adapun untuk menghitung persentase porositas dapat menggunakan Rumus 2 sebagai berikut.

$$\text{Porositas} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100\% \quad (2)$$

dengan:

W_1 = Berat sampel setelah dioven (kg)

W_2 = Berat sampel setelah direndam/jenuh ditimbang di udara (kg)

W_3 = Berat sampel setelah direndam/jenuh ditimbang di air (kg)

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pengujian Karakteristik FABA

Hasil pengujian karakteristik kimia FABA dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Karakteristik Kimia FABA

Parameter Uji	Satuan	Hasil Analisis
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

Hasil pengujian menunjukkan FABA yang digunakan menurut ASTM C618 dikategorikan pozzolan kelas F dikarenakan kadar total silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃) serta besi (Fe₂O₃) sebesar 93,93%, dimana melebihi dari 70%.

D.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Hasil pengujian karakteristik agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3.

Didapat nilai berat jenis kondisi SSD atau kering permukaan sebesar 2,56 gr/cm³ dengan absorpsi sebesar 1,63%. Nilai keausan didapatkan 40,3%, tidak memenuhi spesifikasi. Akan tetapi, agregat tersebut masih dapat digunakan sebagai campuran beton, karena nilainya tidak terlalu jauh dari standar spesifikasi, sehingga tidak terlalu berpengaruh terhadap mutu beton yang direncanakan. Berat volume agregat kasar didapat sebesar 1,33 gr/cm³ dalam kondisi gembur dan 1,49 gr/cm³ dalam kondisi padat.

Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

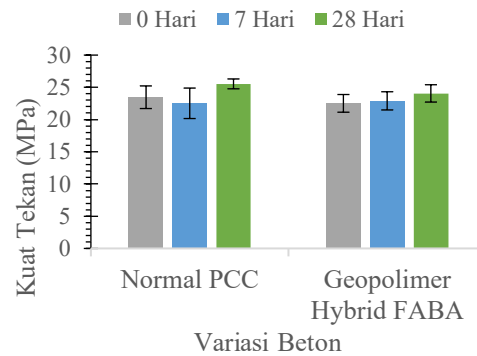
Jenis Pemeriksaan	Hasil	Spesifikasi
Berat jenis (gr/cm ³)		
a. <i>Apparent specific gravity</i>	2,63	2,50 – 2,70
b. <i>Bulk specific gravity on dry</i>	2,52	2,50 – 2,70
c. <i>Bulk specific gravity on SSD</i>	2,56	2,50 – 2,70
d. <i>Absorption (%)</i>	1,63	2,00 – 7,00
Kadar air	0,12	3,00 – 5,00
Keausan (%)	40,3	<40
Modulus kehalusan	6,81	6,00 – 7,10
Berat volume (gr/cm ³)		
a. Kondisi gembur	1,33	1,40 – 1,90
b. Kondisi padat	1,49	1,40 – 1,90

Hasil pengujian karaktersitik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 4. Didapat kadar lumpur sebesar 0,64%. Berat jenis kondisi SSD atau jenuh permukaan sebesar 2,62 gr/cm³. Modulus kehalusan sebesar 2,98. Berat volume kondisi gembur sebesar 1,55 gr/cm³, dan kondisi padat sebesar 1,72 gr/cm³. Kadar organik didapat warna no.2.

Tabel 4. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Jenis Pemeriksaan	Hasil	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 on dry</i>	2,59	2,50 – 2,70
c. <i>Bulk specific gravity on SSD</i>	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

D.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan



Gambar 2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

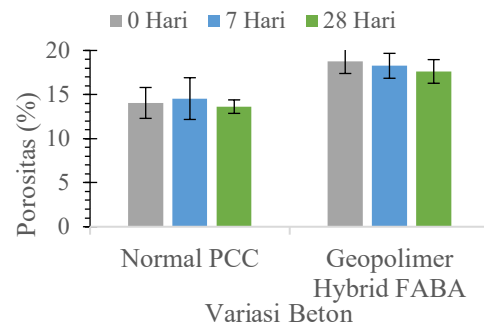
Hasil pengujian kuat tekan beton normal PCC dan beton geopolimer *hybrid* FABA yang direndam di air gambut dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil pengujian kuat tekan beton normal PCC yang direndam air gambut pada umur 0 hari sebesar 23,46 MPa dan menunjukkan penurunan kuat tekan setelah umur 7 hari sebesar 22,52 MPa. Hal ini disebabkan oleh unsur Ca (kalsium) yang terkandung pada beton normal PCC diserang oleh ion asam dari air gambut sehingga akan membentuk senyawa yang larut dalam air gambut berupa kalsium hidroksida (Goyal *et al*, 2009). Selanjutnya, pada umur 28 hari perendaman di air gambut mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 25,53 MPa. Hal ini membuktikan reaksi *puzzolanik* berupa unsur Si (Silika) yang terkandung pada beton PCC bereaksi dengan senyawa kalsium hidroksida Ca(OH)₂ membentuk ikatan gel C-S-H

(Kalsium Silikat Hidrat) setelah 7 hari perendaman air gambut. Gel C-S-H tersebut akan mengisi pori-pori beton sehingga beton lebih kedap dan kuat tekannya meningkat (Olivia, 2015).

Berbeda dengan beton normal PCC, beton geopolimer *hybrid* FABA yang direndam di air gambut terus mengalami peningkatan kuat tekan selama 0 hari hingga 28 hari perendaman. Dimana kuat tekan pada umur 0, 7 dan 28 hari berturut turut adalah 22,51 MPa, 22,90 MPa, dan 24,06 MPa. Hal ini disebabkan oleh sifat puzzolan berupa unsur Si (silika) dan Al (alumina) yang terkandung dalam FABA dan senyawa tambahan berupa Na_2SiO_3 (sodium silikat) bereaksi dengan NaOH (natrium hidroksida) yang membentuk ikatan polimerisasi kuat berupa senyawa N-(C)-A-S-H (Kalsium Alumina Silikat Hidrat) sehingga beton geopolimer *hybrid* dapat melawan ion asam yang terkandung dalam air gambut (García-Lodeiro et al., 2013). Penelitian yang telah dilakukan oleh Munn (2008), menunjukkan hasil pengujian SEM-EDX menunjukkan beton geopolimer dapat bertahan dalam lingkungan asam karena aluminosilikat dalam beton geopolimer *hybrid* dapat diubah dapat membetuk zat seperti spons lembut yang

dapat mempertahankan beton geopolimer terhadap lingkungan asam.

D.4 Pengujian Porositas



Gambar 3. Hasil Pengujian Porositas

Gambar 3. memperlihatkan hasil pengujian porositas beton normal PCC dan geopolimer *hybrid* FABA yang direndam di air gambut selama 0 hingga 28 hari. Nilai porositas kedua jenis beton pada umur 0 hari perendaman air gambut atau 28 hari setelah perawatan beton memiliki nilai porositas yang berbeda, dimana nilai porositas beton normal PCC lebih rendah dari porositas beton geopolimer *hybrid*. Hal tersebut disebabkan oleh FABA yang terkandung dalam beton geopolimer *hybrid* memiliki partikel butir yang lebih halus dibandingkan semen PCC, sehingga menjadikan beton normal PCC memiliki kepadatan yang lebih baik sebelum dilakukan perendaman di air gambut. Menurut penelitian Rommel *et al.*, (2014) Karakteristik fisik berat jenis *fly ash* memiliki massa yang lebih ringan

dari semen PCC dikarenakan unsur-unsur dasar struktur penyusun *fly ash* yang dominan merupakan debu amorf.

Nilai porositas beton normal PCC pada umur 0 hari perendaman air gambut sebesar 14,05% mengalami peningkatan nilai porositas pada umur 7 hari sebesar 14,54%. Hal ini dikarenakan ikatan hidrasi pada beton terganggu oleh serangan asam dari air gambut. Asam dari air gambut akan menyerang menghasilkan kalsium hidroksida Ca(OH)_2 yang larut dalam air yang memuat pori-pori yang baru pada beton PCC (Goyal *et al.*, 2009). Namun, pada hari ke 28 hari perendaman air gambut mengalami penurunan nilai porositas sebesar 13,63%. Penurunan nilai porositas dikarenakan terjadi pemecahan ikatan pozzolan yang terkandung dalam semen PCC bereaksi dengan kalsium hidroksida dan menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang akan mengisi pori-pori pada beton sehingga beton menjadi kedap (Olivia, 2015). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Larici *et al.*, (2020) beton PCC yang direndam pada air gambut mengalami penurunan nilai porositas hingga 120 hari perendaman.

Sedangkan hasil pengujian porositas beton geopolimer *hybrid*

FABA yang direndam di air gambut mengalami penurunan nilai porositas. Nilai porositas pada umur 0,7 dan 28 hari berturut-turut adalah 18,76%, 18,26% dan 17,62%. Penurunan nilai tersebut diakibatkan karena terbentuknya gel (N-A-S-H) dari reaksi polimerisasi, dan gel (C-A-S-H) dari reaksi hidrasi semen dengan bahan pozzolan (Mehta & Siddique, 2017). Gel tersebut akan mengisi pori-pori pada beton sehingga menjadi padat dan tahan terhadap serangan asam dari air gambut.

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

1. Beton geopolimer *hybrid* FABA mengalami peningkatan kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari sebesar 1,73% dan 6,88% terhadap 0 hari perendaman air gambut. Sedangkan kuat tekan beton normal PCC mengalami penurunan kuat tekan pada umur 7 hari sebesar 4,01% terhadap umur 0 hari perendaman air gambut, kemudian terjadi peningkatan kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 8,82% terhadap 0 hari perendaman air gambut.
2. Beton geopolimer *hybrid* FABA mengalami penurunan nilai porositas sebesar 2,67% dan 6,08% terhadap

umur 0 hari pada umur 7 dan 28 hari perendaman air gambut. Sedangkan beton normal PCC mengalami kenaikan porositas sebesar 3,5% pada umur 7 hari perendaman air gambut, selanjutnya pada umur 28 hari mengalami penurunan porositas sebesar 3,01% terhadap 0 hari perendaman air gambut.

E.2 Saran

1. Pelaksanaan pengerjaan pembuatan benda uji sebaiknya dibuat secara seragam agar tidak terjadi perbedaan hasil yang signifikan.
2. Perendaman benda uji dengan air gambut sebaiknya dilakukan di lingkungan asli untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan kondisi lapangan.
3. Menambah umur perendaman benda uji agar mendapatkan hasil yang lebih detail.

Daftar Pustaka

- Agus, F., Anda, M., Jamil, A., & Masganti. (2014). *Lahan Gambut Indonesia Pembentukan, Karakteristik, dan Potensi Mendukung Ketahanan Pangan (Edisi Revisi)*.
- Aryono, N. A. (2001). *Dampak Pembakaran Batubara Indonesia Terkait Kandungan Produk Gas Buang*. 1–5.
- Dzikri, M., & Firmansyah, M. (2018). Pengaruh Penambahan Superplasticizer Pada Beton Dengan Limbah Tembaga (Copper Slag) Terhadap Kuat Tekan Beton Sesuai Umurnya. *Rekayasa Teknik Sipil*, 2(2/REKAT/18).
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204–1209.
- García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2013). Variation in Hybrid Cements Over Time. Alkaline Activation of Fly Ash-Portland Cement Blends. *Cement and Concrete Research*, 52, 112–122.
- Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., & Bhattacharjee, B. (2009). Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 273–283.
- Hardjito, D., Cheak, C. C., & Lee Ing, C. H. (2008). Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-

- based Geopolymer Mortar. *Modern Applied Science*, 2(4), 3–11.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouh, D.M.J., & Rangan, B.V. (2004). On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 101, 467–472.
- Hariawan, J. B. (2011). Pengaruh Perbedaan karakteristik Type Semen Ordinary Portland Cement (OPC) dan Portland Composite Cement (PCC) Terhadap Kuat Tekan Mortar. *Universitas Gunadarma*.
- Kasyanto, H. (2012). Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktivator Sodium Hidroksida dan Sodium Silikat. *Industrial Research Workshop and National Seminar*.
- Kementrian ESDM. (2019). Produksi Penuhi Target, Pasokan Batubara untuk Domestik Melejit.
- Larici, R., Wibisono, G., & Olivia, M. (2020). Durabilitas Beton menggunakan Remah Karet dan FABA (Fly Ash Bottom Ash) untuk Perkerasan Kaku di Lingkungan Gambut. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 16(2), 143.
- Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete Incorporating OPC as Partial Replacement of Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 150, 792–807.
- Mejía, J. M., Rodríguez, E., Mejía De Gutiérrez, R., & Gallego, N. (2015). Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value. *Journal of Cleaner Production*, 104, 346–352. 15.05.044
- Munn, R. (2008). *Experimental Study of Geopolymer Concrete Resistance to Sulphuric Acid Attack*. (May).
- Olivia, M. (2015). Geopolimer sebagai Material Infrastruktur Berkelanjutan di Lingkungan Gambut. *Annual Civil Engineering Seminar*, 6.
- Purba, P. (2007). Pengaruh Kandungan Sulfat Terhadap Kuat Tekan Beton. *Metana*, 4(1), 37–42.
- Ritung, S., & Sukarman. (2016). Kesesuaian Lahan Gambut untuk Pertanian. In *Lahan Gambut Indonesia*.
- Rommel, E., Kurniawati, D., & Pradibta, A. P. (2014). Improvement of The Physical Properties and Reactivity of Fly Ash As Cementitious On Concrete. *Perbaikan Sifat Fisik Dan Reaktifitas Fly Ash Sebagai*

Cementitious Pada Beton, 12, 111–118.

SNI 03-2847-2002. (2002). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (Beta Version).*

Tambingon, F. R., Sumajouw, M. D. J., & Wallah, S. E. (2018). *Kuat Tekan Geopolymer dengan Perawatan Temperatur Ruangan. 6(9), 641–648.*