

# POROSITAS BETON GEOPOLIMER *HYBRID* FABA DENGAN VARIASI MODULUS SILIKAT PADA AIR GAMBUT

Ayu Nofikasari<sup>1)</sup>, Monita Olivia<sup>1)</sup>, Gunawan Wibisono<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

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

Email: ayu.nofikasari3815@student.unri.ac.id, monita.olivia@lecturer.unri.ac.id,  
g.wibisono@eng.unri.ac.id

## *Abstract*

*This study examines the value of porosity in hybrid geopolymer concrete immersed in peat water. FABA as the main ingredient for making concrete has a high silica content. The purpose of this study was to find out the modulus activator with the ratio of modulus silicate ( $M_s$ ) as one of the factors affecting the porosity value of FABA hybrid geopolymer concrete immersed in peat water. This study has been done to determine the percentage of pores in the concrete by examined the characteristics of the geopolymer concrete material. The mix design of the specimens was determined by a silicate modulus ratio of 2, 2.5, and 3, 12M for the NaOH molarity, 0,65 for Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/FABA ratio, and 0,26 for water/FABA ratio. The samples were made in the form of a cylinder concrete with diameter 105 mm and height 105 mm with a total of 24 samples. The samples were cured at room temperature for 28 days and then immersed in peat water for 28 days. The results showed that the lowest geopolymer concrete porosity was found in concrete with  $M_s$  3, which was 11.92% and the highest was found in concrete with  $M_s$  2, which was 14.24%.*

*Keyword : Porosity, fly ash, geopolymer, modulus silicate, NaOH*

## 1. PENDAHULUAN

Riau merupakan wilayah yang mempunyai potensi gambut yang sangat besar dan didominasi dengan gambut dalam yakni mencapai 3.275.420 hektar (Mubekti, 2013). Air gambut bersifat asam. Asam gambut akan mempengaruhi sifat fisik dan mekanik pada beton OPC (*Ordinary Portland Cement*). Serangan asam akan menguraikan kalsium yang banyak terkandung pada semen OPC, sehingga menyebabkan keropos pada beton dan korosi pada tulangan baja. Dibutuhkan suatu alternatif material lain yang memiliki ketahanan di lingkungan ekstrem seperti gambut (ACI, 2008).

Beton geopolimer merupakan alternatif beton yang berikatan secara kimia menggunakan larutan alkali aktivator dan bahan yang banyak

mengandung silika (Si) dan alumina (Al). Geopolimer memiliki ketahanan terhadap asam yang lebih baik karena tidak banyak mengandung kalsium seperti semen OPC. Penelitian yang dilakukan oleh (Olivia, 2015) menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan beton OPC pada lingkungan gambut. Disamping itu, ketersediaan *Fly Ash Bottom Ash* (FABA) juga cukup tinggi di Provinsi Riau. Sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan baku pembuatan beton geopolimer.

FABA adalah limbah padat hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan tungku industri untuk bahan baku konstruksi dan bangunan. FABA memiliki kandungan Si dan Al yang cukup tinggi sehingga cocok berikatan secara kimia dengan larutan alkali basa seperti NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>.

Penggunaan FABA sebagai bahan baku pada campuran beton geopolimer dapat mengurangi penumpukan limbah abu batubara dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 tahun 2021 limbah abu batu bara dihapus dari kategori bahan berbahaya dan beracun (B3) menjadi limbah non B3 oleh Presiden Jokowi sehingga FABA aman digunakan sebagai bahan baku konstruksi pengganti semen *pozzolan*.

Telah banyak penelitian yang mengkaji tentang beton geopolimer dan hubungannya dengan penambahan persentase semen portland sebagai bahan *additive* dalam campuran. Tujuan pada penelitian ini adalah mengkaji bagaimana pengaruh modulus silikat (Ms) atau rasio NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> terhadap nilai porositas beton geopolimer *hybrid* FABA yang direndam di air gambut.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Beton Geopolimer

Davidovits sebagai penemu pertama geopolimer pada tahun 1978 mengemukakan bahwa pada sumber material alami atau hasil buangan limbah industri seperti abu terbang dan abu sekam padi yang mengandung Si dan Al dapat bereaksi dengan larutan alkali menjadi sebuah campuran yang memiliki sifat dan kegunaan seperti semen (Davidovits, 1994). Davidovits juga menyatakan bahwa geopolimer yang berperilaku mirip dengan bahan zeolit yang dikenal karena memiliki kemampuan untuk menyerap limbah beracun ini dapat melumpuhkan limbah unsur berbahaya dalam matriks geopolimer serta berfungsi sebagai pengikat. Unsur-unsur yang berbahaya pada limbah industri seperti abu terbang dan abu sekam padi dicampur dengan senyawa geopolimer ke dalam kerangka tiga dimensi matriks geopolimer. Dari pengertian geopolimer di atas maka beton geopolimer dapat didefinisikan sebagai sebuah beton ramah lingkungan dengan

menggunakan bahan material alami hasil buangan industri sebagai pengganti semen yang berfungsi sebagai pengikat.

### 2.2 Beton Geopolimer *Hybrid* Abu Terbang

Beton geopolimer *Hybrid* adalah beton dengan campuran antara pasir, alkali aktivator, bahan limbah pengganti semen seperti abu terbang, abu sawit, abu sekam padi, dan *silica fume* (SF) dengan tambahan semen *Portland* sebagai *additive*. Limbah abu terbang efektif dalam meningkatkan kekuatan beton pada lingkungan asam karena tidak mudah terurai oleh sifat asamnya dan cocok menjadi material geopolimer *hybrid* (Wijaya *et al.*, 2019).

### 2.3 Durabilitas Beton Geopolimer *Hybrid* Abu Terbang

Durabilitas atau daya tahan beton adalah kemampuan beton untuk bertahan terhadap lingkungan tanpa mengalami kerusakan yang mempengaruhi ketahanan, kekakuan, dan kondisi beton selama umur pakainya (Olivia, 2011). Semakin rendah nilai porositas, maka menghasilkan nilai kuat tekan yang semakin tinggi. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Olivia, Sarker and Nikraz, 2008) beton geopolimer abu terbang menunjukkan nilai penyerapan air dan *sorptivity* yang rendah.

### 2.4 Bahan Penyusun Beton Geopolimer *Hybrid*

#### 2.4.1 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Abu terbang adalah material sisa pembakaran batu bara yang digunakan sebagai pengganti bahan pengikat atau semen pada beton dengan bantuan aktivator. Abu terbang juga didefinisikan sebagai hasil pembakaran atau pembubukan batu bara yang ditransportasikan oleh aliran udara panas yang berupa residu halus (SNI-2460, 2014).

#### 2.4.2 Larutan Aktivator

Abu aktivator merupakan bahan kimia yang dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi unsur Si dan Al. Silikat yang digunakan pada pembuatan mortar dengan geopolimer adalah sodium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) yang mempunyai fungsi sebagai bahan tambah guna mempercepat polimerisasi dan sodium hidroksida (NaOH) sebagai bahan yang mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* (Kasyanto, 2012).

#### 2.4.3 Agregat

Agregat menjadi syarat dalam pembuatan beton geopolimer. Pada penelitian ini agregat yang digunakan adalah agregat kasar dan agregat halus. Agregat kasar adalah agregat dengan ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm yang merupakan hasil desintegrasi alami berupa batu pecah atau kerikil. Sedangkan agregat halus adalah butiran mineral alami atau buatan sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar. Syarat agregat halus dan kasar yang digunakan untuk pembuatan beton geopolimer terdapat pada (SNI 03-1968, 1990).

#### 2.4.4 Air

Air diperlukan pada pembuatan beton untuk memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Air yang dapat diminum umumnya dapat digunakan sebagai campuran beton (Ednor, Sitompul and Olivia, 2017).

#### 2.4.6 Bahan Tambah / *Superplasticizer*

Bahan tambah didefinisikan sebagai material selain air, agregat, dan semen yang digunakan dalam campuran beton atau mortar, yang ditambahkan dalam adukan segera sebelum atau selama pengadukan dilakukan. *Superplasticizer* adalah bahan tambah untuk meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan atau workabilitas campuran. *Superplasticizer* digunakan untuk menjaga kelecakan pada

beton geopolimer (Utami, Herbudiman and Irawan, 2017).

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Pemeriksaan Karakteristik

##### Material

Pengujian karakteristik propertis agregat kasar dan agregat halus dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan dan Laboratorium Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau. Agregat kasar dan agregat halus yang digunakan adalah agregat yang berasal dari *quarry* PT. Mitra Beton di Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar.

Abu terbang yang digunakan berasal dari PLTU Ombilin, Padang, Sumatera Barat dan pengujian karakteristik abu terbang dilakukan di Balai Ristek dan Standarisasi, Padang, Sumatera Barat.

Air yang digunakan untuk perendaman beton geopolimer *hybrid* FABA pada penelitian kali ini adalah air gambut yang berasal dari Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar.

#### 3.2 Perencanaan Campuran Benda

##### Uji

Proses pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau. Pengujian benda uji dilakukan selama umur 28 hari. Pada pengujian porositas direncanakan 21 benda uji untuk beton geopolimer *hybrid* FABA berbentuk silinder dengan diameter 105 mm x 105 mm. Jumlah benda uji pada penelitian kali ini berjumlah 21 sampel.

Perencanaan *mix design* campuran benda uji geopolimer *hybrid* FABA merujuk pada komposisi penelitian (Olivia, 2011). Proporsi campuran beton geopolimer *hybrid* menggunakan rasio proporsi agregat : FABA dan alkali aktivator adalah 2:1. Proporsi lainnya dapat dilihat pada tabel 1 berikut

Tabel 1. Variasi Pembuatan Benda Uji Beton Geopolimer *Hybrid* FABA

Mix	NaOH	Ms	%PCC	Al/FA	W/FA
1	12	2	15	0,65	0,26
2	12	2,5	15	0,65	0,26
3	12	3	15	0,65	0,26
4			PCC		

Variabel tetap pada campuran beton geopolimer *hybrid* FABA ini adalah molaritas NaOH sebesar 12 M, semen PCC sebesar 15%, rasio alkali/FABA 0,65, dan rasio *water*/FABA 0,26. sedangkan yang menjadi variasi bebas pada campuran beton geopolimer *hybrid* FABA ini adalah rasio Ms sebesar 2, 2,5, dan 3.

### 3.3 Pengujian Porositas

Porositas adalah persentase pori-pori dalam beton terhadap volume benda yang dapat menggambarkan kepadatan beton dari segi fisiknya. Menurut (ASTM C-642, 1997), pengujian porositas adalah sebagai berikut:

$$\text{Porositas} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \quad (\text{III.1})$$

Dengan:

$W_1$  = Berat sampe 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)

### 3.4 Pengujian Perubahan Porositas

Nilai perubahan porositas menunjukkan ketahanan beton di lingkungan asam gambut. Nilai perubahan porositas ditunjukkan pada rumus berikut:

$$PP = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100\% \quad (\text{III.2})$$

Dengan:

$S_1$  = Rata-rata porositas beton pada hari ke 0 (kekuatan awal)

$S_2$  = Porositas rata-rata beton setelah masa uji terpapar air gambut

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Abu Terbang

Pengujian karakteristik abu terbang dilakukan di Baristand, Padang, Sumatera Barat. Hasil pengujian karakteristik abu terbang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Karakteristik Abu Terbang

Parameter Uji	Satuan	Hasil Analisa
K <sub>2</sub> O	%	0.12
SiO <sub>2</sub>	%	91.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	1.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.98
CaO	%	0.84
MgO	%	0.98
Na <sub>2</sub> O	%	0.03
SO <sub>3</sub>	%	0.14
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.73
LOI	%	5.53

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik kimia abu terbang tergolong sebagai abu terbang kelas F *low calcium* karena memiliki kandungan SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 70%. Abu terbang kelas F cocok digunakan sebagai campuran beton geopolimer di air gambut karena memiliki kandungan unsur Si dan Al tinggi yang berikatan dengan senyawa alkali aktivator (Yanuari *et al.*, 2021).

### 4.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian karakteristik agregat kasar dan agregat halus dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan dan Laboratorium Struktur Universitas Riau. Agregat kasar dan agregat halus yang digunakan adalah agregat yang berasal dari *quarry* PT. Mitra Beton di jalan Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar. Hasil pengujian karakteristik agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Jenis Pemeriksaan	Hasil	Spesifikasi
Berat jenis (gr/cm <sup>3</sup> )		
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
c. <i>Bulk specific gravity (SSD)</i>	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 <sup>3</sup> )		
a. Kondisi gembur	1,334	1,40 – 1,90
b. Kondisi padat	1,493	1,40 – 1,90

Agregat kasar pada penelitian ini memiliki gradasi dengan ukuran butiran maksimum 20 mm. Berat jenis agregat kasar yang digunakan adalah berat jenis kondisi SSD atau kering permukaan yaitu 2,56 dengan absorpsi sebesar 1,63%. Modulus kehalusan agregat kasar yang digunakan sebesar 6,81. Berat volume agregat kasar yang diuji pada kondisi gembur dan padat masing-masing mempunyai nilai 1,334 gr/cm<sup>3</sup> dan 1,493 gr/cm<sup>3</sup>.

Pada Tabel 4 dapat dilihat hasil pengujian karakteristik agregat kasar yang secara umum memiliki kualitas yang baik karena telah memenuhi *range* standar spesifikasi masing-masing pengujian. Namun terdapat nilai pengujian seperti nilai ketahanan aus sebesar 40,26% yang sedikit belum memenuhi standar spesifikasi yang diisyaratkan, yaitu < 40%.

Tabel 4. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Jenis Pemeriksaan	Hasil	Spesifikasi
Kadar lumpur		
	0,64	<5
Berat jenis (gr/cm <sup>3</sup> )		
e. <i>Apparent specific gravity</i>	2,67	2,50 – 2,70
f. <i>Bulk specific gravity (dry)</i>	2,59	2,50 – 2,70
g. <i>Bulk specific gravity</i>	2,62	2,50 – 2,70

Jenis Pemeriksaan	Hasil	Spesifikasi
<i>gravity (SSD)</i>		
h. <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 <sup>3</sup> )		
c. Kondisi gembur	1,551	1,40 – 1,90
d. Kondisi padat	1,723	1,40 – 1,90
Kadar organik	2	<No. 3

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai kadar lumpur sebesar 0,64 yakni sudah memenuhi standar SNI 03-4142-1996. Nilai berat jenis SSD atau kering permukaan agregat halus yang digunakan yakni 2,62 dan sudah memenuhi persyaratan SNI 03-1970-1990. Modulus kehalusan sebesar 2,98 dan sudah sesuai dengan persyaratan SNI 03-1968-1990. Nilai berat volume yang diuji pada kondisi padat sebesar 1,723 dan gembur sebesar 1,551 dengan keduanya sudah memenuhi persyaratan yang ditentukan SNI 03-4804-1998.

### 4.3 Hasil Pengujian Karakteristik Gambut

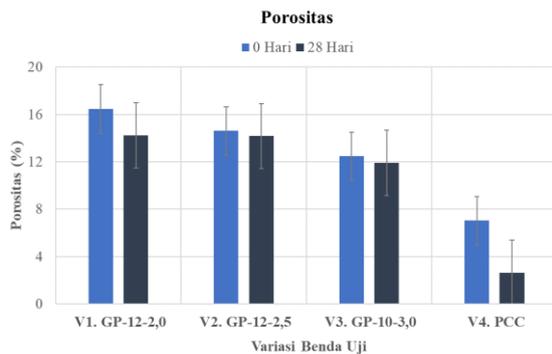
Pengujian karakteristik air gambut dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Dinas Pekerjaan Umum dan Tata Ruang, Provinsi Riau. Air gambut yang digunakan untuk perendaman beton geopolimer ini berasal dari Rimbo Panjang, Kabupaten Kampar, Riau.

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik air gambut pada Tabel 5, air gambut tersebut memiliki pH sebesar 4,72 < 6,5-8,5 yang berarti tidak memenuhi standar air minum untuk dikonsumsi (SNI 01-3553, 2006).

Tabel 5. Hasil Pengujian Karakteristik Gambut

Parameter	Satuan	Hasil
Warna	mg/L	525
pH	-	4.72
Fe	mg/L	0.3282
Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/L	65.8
Zat Organik (KmnO <sub>4</sub> )	mg/L	49.88

#### 4.4 Hasil Pengujian Porositas



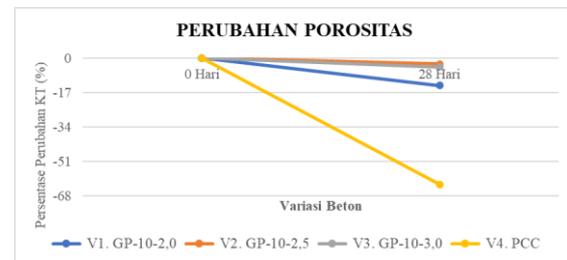
Gambar 1. Hasil Pengujian Porositas

Berdasarkan Gambar 1 didapatkan hasil pengujian porositas beton geopolimer FABA dengan perendaman air gambut. Pada umumnya masing-masing beton geopolimer mengalami penurunan nilai porositas hingga umur 28 hari perendaman air gambut. Pada umur awal 0 hari, nilai porositas tertinggi terdapat pada variasi 1 dengan rasio Ms 2, yakni sebesar 16,46 dan nilai porositas terendah terdapat pada variasi 3 dengan rasio Ms 3, yakni sebesar 12,47. Hal ini menunjukkan penambahan jumlah rasio modulus silikat menyebabkan penurunan nilai porositas pada beton geopolimer. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Thokchom, Ghosh and Ghosh, 2009) yang menyatakan bahwa alkali aktivator berpengaruh pada nilai porositas, semakin besar nilai Ms maka semakin kecil nilai porositas beton.

Pada variasi 4 yakni beton PCC (beton kontrol), nilai porositas lebih kecil dibandingkan semua jenis variasi beton geopolimer lainnya, yakni sebesar 7,03. Pada umur 28 hari didapatkan nilai porositas tertinggi dan terendah masing-masing pada variasi 1 dan variasi 3, yakni sebesar 14,24 dan 11,92. Hal ini diakibatkan karena beton PCC memiliki waktu ikat yang lebih cepat dibandingkan dengan beton geopolimer. Disamping itu beton geopolimer juga dibuat menggunakan larutan alkali aktivator yang

kental sehingga menyebabkan banyak pori pada beton geopolimer.

#### 4.5 Perubahan Porositas



Gambar 2. Hasil Perubahan Porositas

Berdasarkan Gambar 2 didapatkan penurunan porositas terbesar pada beton geopolimer variasi 1 dengan Ms 2 sebesar 13,5% dengan nilai porositas 0 hari sebesar 16,46 dan nilai porositas pada 28 hari perendaman air gambut sebesar 14,24 terdapat. Nilai perubahan porositas yang besar ini diakibatkan beton geopolimer dengan rasio Ms 2 memiliki pori-pori yang besar pada umur awal. Pada umumnya beton geopolimer mengalami penurunan porositas pada umur 28 hari. Menurut (Bakharev, 2005) beton geopolimer terus mengalami reaksi kimia antara alkali aktivator dan FABA seiring dengan penambahan umur beton pada rendaman air gambut. Jika dibandingkan dengan perubahan porositas pada beton PCC sebesar 62,32%. Beton PCC mengalami perubahan yang lebih besar karena beton PCC memiliki struktur pori yang lebih kedap.

## 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Nilai porositas terbaik terdapat pada beton geopolimer hybrid variasi 3 dengan Ms 3.
2. Campuran beton geopolimer dengan rasio modulus silikat yang lebih tinggi dapat menyebabkan pori beton terisi dan lebih padat sehingga

menyebabkan nilai porositas yang lebih kecil.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan maka dapat disampaikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya, sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan variasi temperatur pada waktu perawatan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada campuran beton geopolimer.
2. Perlu adanya penelitian lanjutan dengan penambahan variasi lain selain rasio Ms pada campuran beton geopolimer.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- ACI (2008) *Guide to Durable Concrete ACI 201.2R-08, Concrete*.
- ASTM C-642 (1997) 'Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, United States', *Annual Book of ASTM Standards*, (March), pp. 1–3.
- Bakharev, T. (2005) 'Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack', *Cement and Concrete Research*, 35(4), pp. 658–670. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005.
- Davidovits, J. (1994) 'Properties of Geopolymer Cements', *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, pp. 131–149.
- Ednor, M., Sitompul, I. R. and Olivia, M. (2017) 'Kuat Tekan Dan Perubahan Berat Mortar Menggunakan Bahan Tambah Abu Sekam Padi', *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP)*.
- Kasyanto, H. (2012) 'Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Dan Sodium Silikat', *Industrial Research Workshop and National Seminar*, 3, pp. 254–259. Available at: [www.sinarharapan.co.id](http://www.sinarharapan.co.id).
- Mubekti, M. (2013) 'Studi Pewilayahan Dalam Rangka Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan Di Provinsi Riau', *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 13(2), pp. 88–94. doi: 10.29122/jsti.v13i2.883.
- Olivia, M. (2011) 'Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete', (May).
- Olivia, M. (2015) 'Geopolimer Sebagai Material Infrastruktur Berkelanjutan Di Lingkungan Gambut', *Annual Civil Engineering Seminar*, p. 6.
- Olivia, M., Sarker, P. K. and Nikraz, H. (2008) 'Water Penetrability of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete', (46), pp. 517–530.
- PP Nomor 22 (2021) 'Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pedoman Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup', *Sekretariat Negara Republik Indonesia*, 1(078487A), p. 483. Available at: <http://www.jdih.setjen.kemendagri.go.id/>.
- SNI-2460:2014 (2014) 'SNI 2460:2014 Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton', p. 16.
- SNI 01-3553-2006 (2006) 'Air Minum Dalam Kemasan', *Badan Standarisasi Nasional*, pp. 1–9.
- SNI 03-1968-1990 (1990) 'Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar', *Badan Standar Nasional*, pp. 1–5. Available at: <http://staff.uny.ac.id/sites/default/files/pendidikan/dr-slamet-widodo-st-mt/sni-03-1968-1990.pdf>.
- Thokchom, S., Ghosh, P. and Ghosh, S. (2009) 'Effect of Water Absorption, Porosity and Sorptivity on Durability of Geopolymer Mortars', *Journal of Engineering and Applied Sciences*,

- 4(7), pp. 28–32.
- Utami, R., Herbudiman, B. and Irawan, R. R. (2017) ‘Efek Tipe Superplasticizer Terhadap Sifat Beton Segar dan Beton Keras pada Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash’, 3(1). Available at: <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/1183/1393>.
- Wijaya, M. F. *et al.* (2019) ‘Characteristics Of Geopolymer Hybrid Concrete in Peat Water’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 615(1). doi: 10.1088/1757-899X/615/1/012120.
- Yanuari, R. *et al.* (2021) ‘Geopolymer Hybrid Fly Ash Concrete For Construction And Conservation In Peat Environment: A review’, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 847(1). doi: 10.1088/1755-1315/847/1/012031.