

## KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER ABU TERBANG *HYBRID* MENGGUNAKAN SEMEN PORTLAND

Miguel Felix Wijaya<sup>1</sup>, Monita Olivia<sup>2\*</sup>, Edy Saputra<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

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

Email: [miguel.felixwijaya@student.unri.ac.id](mailto:miguel.felixwijaya@student.unri.ac.id) , [\\*monitaolivia@lecturer.unri.ac.id](mailto:*monitaolivia@lecturer.unri.ac.id) (corresponding author), [edysaputra\\_eng@yahoo.com](mailto:edysaputra_eng@yahoo.com)

### ABSTRAK

Geopolimer *hybrid* dibuat dengan mengaktifkan abu terbang menggunakan alkali aktivator dan semen Portland sebagai bahan pengganti sebagian abu terbang untuk perawatan pada suhu ruang. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kuat tekan mortar geopolimer abu terbang *hybrid* dengan menggunakan semen Portland, yaitu OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan PCC (*Portland Composite Cement*). Prosedur penelitian dimulai dengan pengujian karakteristik material yang digunakan, yaitu abu terbang dan agregat halus. Abu terbang PLTU Ombilin, Padang yang digunakan. Sedangkan, agregat halus Teratak Buluh, Kampar yang digunakan. Larutan alkali aktivator yang digunakan NaOH 10M dan 12M dengan rasio modulus aktivator (Ms) 1,5 dan 2,5. Persentase penggantian abu terbang dengan semen yang digunakan adalah 10% dan 15%. Benda uji berupa mortar berbentuk kubus berukuran 5x5x5 cm. Pengujian yang dilakukan adalah uji kuat tekan. Uji kuat tekan dilakukan setelah mortar berumur 7 hari dan 28 hari perawatan suhu ruang. Hasil pengujian menunjukkan kuat tekan tertinggi pada mortar geopolimer abu terbang *hybrid* dengan variasi NaOH 10M, Ms 2,5 dan penggantian sebagian abu terbang dengan semen sebesar 15% pada umur 7 hari dan 28 hari perawatan suhu ruang, yaitu sebesar 8,27 MPa dan 13,33 MPa menggunakan OPC. Sedangkan, mortar geopolimer abu terbang *hybrid* menggunakan PCC pada umur 7 hari dan 28 hari, yaitu sebesar 6,27 MPa dan 11,47 MPa. Berdasarkan hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa mortar geopolimer abu terbang *hybrid* menggunakan OPC memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan PCC dari umur 7 hari hingga 28 hari perawatan suhu ruang.

**Kata Kunci:** Abu terbang, geopolimer *hybrid*, kuat tekan, mortar, semen Portland

### ABSTRACT

*Geopolymer hybrid was made by activating fly ash with alkaline activator and Portland cement for replacing fly ash to accelerate curing in ambient temperature. This study aims to examine the compressive strength of geopolymer hybrid mortar using Portland cement, that is OPC (Ordinary Portland Cement) and PCC (Portland Composite Cement). The research procedure began with test the characteristics of the material used, that is fly ash and fine aggregate. The fly ash came from the Ombilin PLTU, Padang. Meanwhile, the fine aggregates came from Teratak Buluh, Kampar. Alkaline activator solutions used were 10M and 12M NaOH, modulus activator ratio (Ms) 1.5 and 2.5. The percentage of replacement of fly ash with cement used is 10% and 15%. The size of the mold used was the cube of 5x5x5 cm. Tests carried out include the mortar compressive strength test. Compressive strength testing was carried out at 7 days and 28 days of curing in ambient temperature. From the test results obtained the optimum compressive strength on geopolymer hybrid mortar was the variation of 10M NaOH, 2.5 and 15% replacement of fly ash with cement at 7 days and 28 days curing in ambient temperature by 8.27 MPa and 13.33 MPa used OPC. Meanwhile, geopolymer hybrid mortar used PCC at 7 days and 28 days by 6.27 MPa and 11.47 MPa. Based on the results, the geopolymer hybrid mortar using OPC has higher compressive strength than using PCC at 7 days to 28 days curing in ambient temperature.*

**Keywords:** Fly ash, geopolymer hybrid, compressive strength, mortar, Portland cement

## 1. PENDAHULUAN

Abu terbang adalah limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) sisa pembakaran batu bara yang berpotensi mencemari lingkungan karena mengandung logam berat berdasarkan Peraturan Pemerintah No 101 Tahun 2014 [1]. Indonesia adalah negara penghasil batu bara dengan jumlah produksi mencapai sebesar 218 juta ton pada tahun 2016 [2]. Pembakaran batu bara menghasilkan 5% polutan abu padat dengan sekitar 80-90% total jumlah abu terbang, 10-20% sisanya berupa abu dasar. Pengelolaan limbah hasil produksi secara tepat perlu dilakukan untuk menghindari pencemaran lingkungan.

Salah satu cara terbaik untuk menanggulangi limbah abu terbang adalah memanfaatkan abu terbang sebagai campuran beton. Berdasarkan ASTM C-618 2005 [3], abu terbang bersifat pozzolanik yang membuat abu terbang cocok digunakan sebagai alternatif pengganti semen ke dalam campuran beton ataupun mortar. Selain itu, penggantian semen dengan abu terbang dapat mengurangi efek yang ditimbulkan dari produksi semen [4]. Semen Portland yang diproduksi menghasilkan gas CO<sub>2</sub> (karbon dioksida) yang dilepaskan ke atmosfer sehingga menyebabkan pemanasan global. Oleh karena itu, limbah abu terbang dapat dimanfaatkan dalam campuran geopolimer yang dibuat tanpa semen menggunakan larutan alkali aktivator.

Joseph Dovidovits [5] mengembangkan sebuah penelitian material alternatif pengganti semen yang disebut dengan geopolimer. Bahan utama dari geopolimer adalah limbah hasil industri yang mengandung banyak silika dan alumina. Pengaktifan kedua senyawa tersebut menggunakan larutan aktivator seperti NaOH (sodium hidroksida) dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (sodium silikat). Perkembangan penelitian geopolimer sebagai bahan konstruksi alternatif secara umum masih memiliki kendala dalam pengaplikasian. Penelitian Habert et al. [6] menunjukkan beton geopolimer harus menggunakan perawatan suhu tinggi untuk mempercepat polimerisasi dan meningkatkan kekuatan. Akan tetapi, sulit untuk menggunakannya dalam pembuatan langsung di lapangan [7].

Penelitian Mejía et al. [8] menunjukkan ada bahan geopolimer jenis baru yang telah dikembangkan untuk mengatasi masalah tersebut. Geopolimer tersebut dikenal dengan geopolimer *hybrid*, yaitu mengkombinasikan geopolimer dengan bahan lain yang mengandung kalsium seperti OPC (*Ordinary Portland Cement*) untuk membantu perawatan pada suhu ruang. Geopolimer *hybrid* dibuat dengan proporsi semen Portland 20-30%, dan proporsi abu terbang 60-70%. Penelitian yang dilakukan García-lodeiro et al. [9] menunjukkan terjadi peningkatan kekuatan dan pengurangan porositas geopolimer yang dicampur dengan OPC pada perawatan suhu ruang. Hal tersebut membuktikan bahwa penggunaan OPC membantu ikatan polimerisasi yang lebih cepat sehingga meningkatkan kekuatan pada perawatan suhu ruang.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengkaji karakteristik kimia abu terbang PLTU Ombilin Padang, mengkaji karakteristik agregat halus Sungai Teratak Buluh, Kampar, dan menganalisis kuat tekan mortar

geopolimer abu terbang *hybrid* menggunakan semen Portland, yaitu OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan PCC (*Portland Composite Cement*) serta membandingkan kuat tekan kedua mortar geopolimer abu terbang *hybrid*.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Mortar

Mortar dibuat dari beberapa material meliputi semen, agregat halus dan air [10]. Kegunaan mortar adalah untuk menambah lekatan pada bagian konstruksi tertentu lainnya. Ukuran mortar adalah kubus kecil dengan dimensi sisi 5x5x5 cm. Spesifikasi mortar dibagi menjadi empat tipe yang dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Spesifikasi Mortar [10]

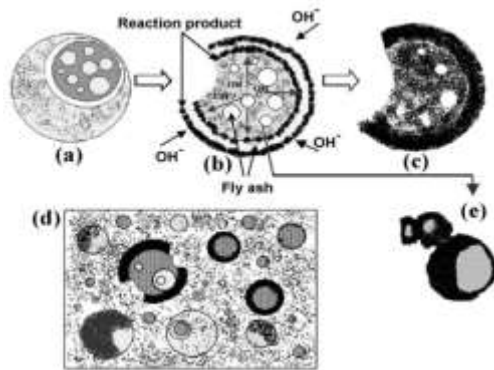
Tipe Mortar	Kuat Tekan Minimum	Aplikasi
Mortar tipe M	17,2 Mpa (kuat tekan tinggi)	1. Dinding dekat tanah 2. Adukan pipa air kotor 3. Adukan dinding penahan tanah 4. Adukan untuk jalan
Mortar tipe S	12,4 Mpa (kuat tekan sedang)	Diperlukan untuk daya rekat tinggi dan adanya gaya samping
Mortar tipe N	5,2 Mpa (kuat tekan rendah)	Untuk pasangan dinding yang tidak menahan beban dan tidak ada persyaratan mengenai kekuatan
Mortar tipe O	2,5 Mpa (kuat tekan rendah)	Untuk konstruksi dinding yang tidak menahan beban berat dan pengaruh cuaca ringan

### 2.2 Geopolimer Abu Terbang

Geopolimer merupakan material polimerisasi yang disintesa dari bahan silika dan alumina yang tahan terhadap suhu tinggi dapat digunakan sebagai material anti kebakaran. Mortar geopolimer dibuat dengan campuran antara agregat halus, air dan bahan pengikat tanpa semen yang dihasilkan dari reaksi polimerisasi antara alkali aktivator seperti NaOH (sodium hidroksida) dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (sodium silikat) dengan limbah abu terbang yang mengandung silika dan alumina [11].

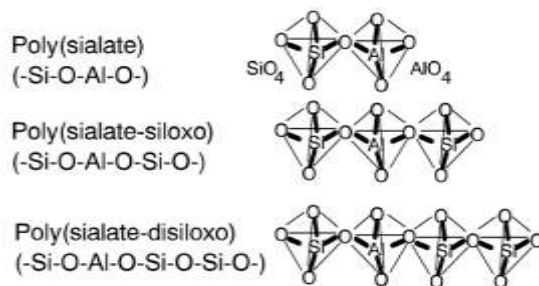
Tahap reaksi larutan alkali aktivator dengan abu terbang dijelaskan oleh Fernandez-Jimenez et al. [12] dapat dilihat pada Gambar 1. Tahap awal pemutusan partikel abu terbang oleh ion hidroksida OH<sup>-</sup> serta proses pengikatan polimerisasi. Pemutusan partikel abu terbang dimulai dengan reaksi kimia ion OH<sup>-</sup> dari larutan alkali aktivator ke permukaan abu terbang. Reaksi berlanjut ke bagian dalam dan menuju keluar atau sebaliknya secara bersamaan hingga seluruh abu terbang bereaksi. Reaksi dari alkali aktivator berlanjut hingga bagian partikel terkecil. Namun, juga terjadi terbentuknya lapisan penghambat dari bulatan-bulatan kecil yang tidak bereaksi dengan alkali. Pada tahap akhir akan terbentuk susunan geopolimer hasil reaksi dari abu terbang secara sempurna,

hanya sebagian dari partikel abu terbang yang tidak bereaksi.



Gambar 1. Tahap Reaksi Larutan Alkali Aktivator dengan Abu Terbang [12]

Tahap ikatan polimerik yang terjadi pada geopolimer adalah reaksi unsur dari alkali aktivator dengan mineral silika dan alumina sehingga menghasilkan rantai ikatan struktur O-Si-Al-O (O-T-O) yang konsisten [5]. Davidovits membagi *polysialate* menjadi tiga golongan, yaitu: *poly(sialate)* tipe (Si-O-Al-O), *poly(sialate-siloxo)* tipe (Si-O-Al-O-Si-O) dan *poly(sialate-disiloxo)* tipe (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O) dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Tipe Golongan *Polysilicate* [5]

### 2.3 Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid

Mortar geopolimer abu terbang *hybrid* dibuat dengan campuran antara agregat halus, air dan bahan pengikat yang dihasilkan dari reaksi polimerisasi antara alkali aktivator dengan silika dan alumina dari limbah abu terbang serta penggunaan semen Portland sebagai campuran.

Menurut García-lodeiro & Fernández-jiménez [13] geopolimer *hybrid* menggunakan antara 20-30% semen Portland dan 70-80% abu terbang yang diaktifkan dengan larutan alkali (NaOH) konsentrasi *moderate* (sedang) serta dilakukan perawatan di udara pada suhu ruang (25°C). Sedangkan, geopolimer menggunakan 100% abu terbang dan tidak menggunakan semen Portland yang diaktifkan dengan larutan alkali (NaOH) konsentrasi *strong* (kuat) serta dilakukan perawatan pada suhu tinggi (85°C).

## 2.4 Material Penyusun Mortar Geopolimer Hybrid

### 2.4.1 Agregat Halus

Agregat halus atau pasir memiliki berbagai macam jenis. Salah satunya adalah pasir alami yang berasal dari sungai atau hasil pemecahan batu. Kualitas agregat halus berpengaruh terhadap kualitas beton. Sifat-sifat yang signifikan pada agregat halus adalah kadar air, penyerapan air, kepadatan, dan kandungan organik memberikan pengaruh terhadap kekuatan serta ketahanan mortar. Agregat halus merupakan agregat yang ukuran butirnya lebih kecil dari ayakan No. 4 (4,75 mm) dan lebih besar dari ayakan No. 200 (0,075 mm) berdasarkan SNI 03-1968-1990 [14].

### 2.4.2 Abu Terbang

Abu terbang adalah limbah hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Pembakaran batu bara menghasilkan sekitar 80-90% total jumlah abu terbang dan 10-20% berupa abu dasar. Abu terbang disebut bahan anorganik yang terbentuk dari mineral karena proses pembakaran dan berbentuk partikel halus amorf [15]. Abu terbang memiliki partikel yang lolos ayakan No. 100 (0,15 mm) dan bersifat pozzolanik karena mengandung silika (Si) dan alumina (Al), tetapi sedikit mengandung kalsium (Ca).

Berdasarkan ASTM C-618 2005 [3], abu terbang ada tiga kelas, yaitu kelas C, N dan F. Abu terbang kelas C memiliki jumlah kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  minimal 50% dan kandungan CaO lebih dari 10%. Abu terbang kelas N memiliki jumlah kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  minimal 70% dan kandungan CaO lebih dari 10%. Sedangkan, abu terbang kelas F memiliki jumlah kandungan  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  minimal 70% dan kandungan CaO kurang dari 10%. Abu terbang kelas F adalah abu terbang rendah kalsium dengan kandungan CaO kurang dari 10%. Oleh karena itu, abu terbang kelas F cocok untuk dibuat geopolimer karena mengandung silika dan alumina tinggi serta kalsium rendah sehingga dapat bereaksi baik dengan alkali membentuk ikatan polimerisasi [16].

### 2.4.3 Semen Portland

Semen Portland merupakan semen yang dibuat dengan cara menghancurkan terak semen sehingga berbentuk serbuk halus dan ditambah mineral dari kalsium, alumina dan silikat [17]. Adapun bahan pembentuk semen Portland adalah kalsium (CaO) dari batu kapur, silikat ( $\text{SiO}_2$ ) dari tanah lempung dan alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dari tanah lempung.

Berdasarkan ASTM C-150 2014 [17] ada beberapa jenis semen Portland. Salah satunya adalah *Ordinary Portland Cement* (OPC) dan *Portland Composite Cement* (PCC). OPC adalah semen Portland tipe I yang digunakan untuk konstruksi umum dan tidak memerlukan persyaratan khusus, yaitu tidak tahan sulfat, tidak tahan panas hidrasi, terbuat dari banyak kalsium dan sedikit bahan tambah, tetapi memiliki kekuatan awal lebih cepat. Sedangkan, PCC merupakan semen yang digunakan

untuk keperluan konstruksi umum, tetapi lebih tahan sulfat dan asam sedang serta lebih kedap air.

#### 2.4.4 Air

Air merupakan komponen penting dalam pembuatan mortar untuk proses hidrasi, reaksi kimiawi dengan semen dan sebagai pelumas pada campuran mortar agar mudah pengerjaannya. Pada umumnya, air yang digunakan adalah aquades. Berdasarkan SNI 2847-2013 [18], standar air yang digunakan pada campuran mortar adalah air dengan pH normal = 7, tidak mengandung senyawa-senyawa yang tercemar, tidak mengandung ion klorida > 0,5 gr/l dan tidak mengandung senyawa sulfat > 1 gr/l.

Jumlah air terlalu banyak menyebabkan gelembung udara setelah proses hidrasi selesai. Namun, apabila jumlah air terlalu sedikit menyebabkan proses hidrasi tidak selesai. Oleh karena itu, intensitas penggunaan air harus sesuai dengan target kekuatan yang diinginkan.

#### 2.4.5 Larutan Alkali Aktivator

Reaksi polimerisasi yang terjadi pada geopolimer berasal dari larutan alkali aktivator. Larutan alkali aktivator merupakan campuran sodium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan sodium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ). Larutan aktivator sangat berpengaruh untuk menghasilkan kekuatan yang terbaik sehingga diperlukan kombinasi yang sesuai [19]. Sodium silikat berfungsi sebagai katalis untuk meningkatkan kecepatan reaksi polimerik dan sebagai perekat antara material lain sehingga membantu dalam pembentukan pasta mortar. Sedangkan, sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan silika dan alumina dari abu terbang sehingga dihasilkan ikatan polimerik yang kuat [20].

Sodium hidroksida secara alami berbentuk padatan dan biasanya tersedia dalam bentuk serpihan, butiran ataupun larutan. Sodium hidroksida juga larut dengan cepat di dalam air dan melepaskan panas ketika dilarutkan. Sedangkan, sodium silikat dikenal dengan natrium *metasilicate* (*waterglass*). Zat ini berbentuk kristal yang dapat larut dalam air menghasilkan larutan alkali aktivator. Perbandingan antara sodium silikat dan sodium hidroksida pada suatu larutan alkali aktivator disebut modulus aktivator (Ms).

#### 2.4.6 Superplasticizer

*Superplasticizer* adalah bahan tambah yang digunakan untuk meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan (*workability*). Penggunaan *superplasticizer* juga berguna untuk mengurangi intensitas air yang digunakan untuk membuat mortar dengan rencana mutu tertentu. Selain itu, *superplasticizer* berguna untuk membuat mortar tanpa terjadinya pemisahan (*segregasi/bleeding*) dengan jumlah air yang besar [21]. Salah satu contoh *superplasticizer* adalah *sikament NN*.

## 2.5 Pengujian Mortar Geopolimer Hybrid

### 2.5.1 Kuat Tekan

Berdasarkan SNI 03-6825-2002 [10], kuat tekan mortar adalah beban maksimum dengan satuan luas benda uji mortar berbentuk kubus dengan ukuran dan umur tertentu. Ukuran mortar umumnya adalah kubus kecil dengan dimensi sisi 5x5x5 cm. Kuat tekan mortar dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\sigma_m = P / A$$

dengan:

- $\sigma_m$  = kuat tekan mortar (MPa)  
 P = beban maksimum (N)  
 A = luas penampang yang dibebani ( $\text{mm}^2$ )

## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Persiapan Material Penelitian

#### 3.1.1 Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan adalah pasir dari Teratak Buluh, Kampar. Agregat halus dengan ukuran butirnya lebih kecil dari ayakan No. 4 (4,75 mm) dan lebih besar dari ayakan No. 200 (0,075 mm) berdasarkan SNI 03-1968-1990 [14]. Pengujian karakteristik agregat halus meliputi berat volume, berat jenis, kadar air, analisa saringan agregat, kadar organik dan kadar lumpur. Karakteristik agregat halus diuji di Laboratorium Teknologi Bahan, Teknik Sipil, Universitas Riau.

#### 3.1.2 Abu Terbang

Abu terbang diperoleh dari PLTU Ombilin, Padang. Sebelum menggunakannya, abu terbang terlebih dahulu dikeringkan di dalam oven. Setelah dikeringkan, abu terbang kemudian diayak dengan saringan No. 100 (0,15 mm). Pengujian karakteristik abu terbang dilakukan di PT. Sucofindo, Pekanbaru berdasarkan ASTM C-618 2005 [3].

#### 3.1.3 Semen Portland

Semen yang digunakan adalah semen tipe I OPC (*Ordinary Portland Cement*) dan PCC (*Portland Composite Cement*). Pengujian karakteristik semen dilakukan PT. Semen Padang berdasarkan ASTM C-150 2014 dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Karakteristik Semen Portland [22]

Parameter	Satuan	Semen Portland	
		OPC	PCC
$\text{SiO}_2$	%	20,92	23,04
$\text{Al}_2\text{O}_3$	%	5,49	7,40
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	%	3,78	3,36
CaO	%	65,21	57,38

### 3.1.4 Air

Air yang digunakan adalah *aquades* dari Pekanbaru dengan pH normal (pH = 7) sesuai SNI 7974-2013 [18]. Air tersebut telah memenuhi standar air yang digunakan untuk membuat mortar.

### 3.1.5 Larutan Alkali Aktivator

Larutan alkali aktivator yang digunakan adalah sodium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan sodium hidroksida (NaOH). Perbandingan antara sodium silikat dan sodium hidroksida atau modulus aktivator (Ms) digunakan untuk perencanaan campuran mortar.

Sodium hidroksida berbentuk padatan dilarutkan di dalam air sehingga menjadi larutan sesuai dengan kemolaran yang diinginkan. Sedangkan, sodium silikat berbentuk larutan memiliki mol rasio 2,26 yang terdiri dari senyawa solid  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Na}_2\text{O}$  sebanyak 31,75% dan 14,51% serta total sebanyak 46,26%. Pengujian karakteristik sodium silikat dari PT. Sinar Sakti Kimia, Jawa Tengah dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Parameter	Satuan	Hasil analisis
$\text{SiO}_2$	%	31,75
$\text{Na}_2\text{O}$	%	14,51
Total solid	%	46,26
Mol ratio		2,26
Density	gr/mL	1,56
Baume	Be	52

### 3.1.6 Superplasticizer

*Superplasticizer* yang digunakan berasal dari PT. Sika Indonesia, yaitu *sikament NN*. Senyawa kimia pada *sikament NN* adalah *naphthalene formaldehyde sulfonate* dengan densitas 1,17 hingga 1,19 kg/l.

### 3.2 Pengujian Karakteristik Material

Karakteristik material diuji untuk mengetahui sifat material yang digunakan. Pengujian karakteristik dilakukan pada agregat halus dan abu terbang yang digunakan untuk membuat mortar. Karakteristik agregat halus diuji di Laboratorium Teknologi Bahan, Teknik Sipil, Universitas Riau. Sedangkan, karakteristik abu terbang diuji di PT. Sucofindo, Pekanbaru.

### 3.3 Perencanaan Campuran Benda Uji

Perencanaan campuran mortar geopolimer abu terbang *hybrid* yang tepat didapatkan dari hasil pengujian karakteristik material. Campuran mortar geopolimer *hybrid* terdiri dari agregat halus, abu terbang, semen Portland, air, larutan alkali aktivator dan *superplasticizer*.

Material penyusun mortar geopolimer *hybrid* disiapkan dengan variasi konsentrasi NaOH 10M dan 12M, nilai rasio modulus aktivator ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ) 1,5 dan 2,5, penggantian sebagian abu terbang dengan semen sebesar 10% dan 15% serta tipe semen yang digunakan adalah OPC dan PCC. Perencanaan campuran mortar dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Perencanaan Campuran Mortar

	NaOH (M)	Rasio Ms	% Semen	Tipe Semen	% Abu Terbang
Mix 1	10	1,5	10	OPC	90
	10	1,5	10	PCC	90
	10	1,5	15	OPC	85
	10	1,5	15	PCC	85
Mix 2	12	1,5	10	OPC	90
	12	1,5	10	PCC	90
	12	1,5	15	OPC	85
	12	1,5	15	PCC	85
Mix 3	10	2,5	10	OPC	90
	10	2,5	10	PCC	90
	10	2,5	15	OPC	85
	10	2,5	15	PCC	85

Mix 1 dilakukan dengan penggantian 10% dan 15% semen OPC atau PCC yang akan digunakan pada mortar geopolimer abu terbang *hybrid*. Pada setiap benda uji untuk mix ini, NaOH yang digunakan adalah 10M dan rasio modulus aktivator (Ms) sebesar 1,5. Pada mix 2 dilakukan dengan konsentrasi NaOH 12M. Pada setiap benda uji untuk mix ini, rasio modulus aktivator (Ms) sebesar 1,5 serta semen OPC atau PCC yang akan digunakan sebagai penggantian sebesar 10% dan 15%. Sedangkan, mix 3 dilakukan dengan rasio modulus aktivator (Ms) 2,5. Pada setiap benda uji untuk mix ini, konsentrasi NaOH sebesar 10M serta semen OPC atau PCC yang akan digunakan sebagai penggantian sebesar 10% dan 15%. Kuat tekan diuji pada umur 7 dan 28 hari dengan perawatan suhu ruang.

### 3.4 Pelaksanaan Pembuatan Benda Uji

Pencampuran mortar geopolimer abu terbang *hybrid* dilakukan menggunakan alat *mixer* mortar di Laboratorium Teknologi Bahan, Teknik Sipil, Universitas Riau. Alat tersebut digunakan untuk mengurangi ketidakmerataan berbagai bahan campuran selama pengadukan. Campuran agregat halus, abu terbang, semen Portland, larutan alkali aktivator dan *superplasticizer* diaduk selama lima menit, kemudian dicetak dalam *mould* mortar. Setiap variasi mortar geopolimer abu terbang *hybrid* berjumlah tiga benda uji pada masing-masing umur pengujian mortar dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Pembuatan Benda Uji Mortar

Mix no.	Variasi larutan aktivator	Persentase semen (%)		Umur Pengujian (hari)
		OPC	PCC	
1.	NaOH = 10M Ms = 1,5	10; 15	10; 15	7; 28
2.	NaOH = 12M Ms = 1,5	10; 15	10; 15	7; 28
3.	NaOH = 10M Ms = 2,5	10; 15	10; 15	7; 28

### 3.5 Rest Periode dan Perawatan Suhu Ruang

Reaksi polimerisasi berlangsung sekitar 0 sampai 5 hari. Oleh karena itu, diperlukan *rest periode* agar benda uji mortar menyatu dan mengeras sebelum dibuka cetakan. Berdasarkan penelitian Djwantoro Hardjito & Rangan [16], *rest periode* optimum geopolimer terjadi selama 3 hari. Setelah 3 hari, campuran geopolimer telah menyatu dan dapat dilepas dari cetakan. Selanjutnya, perawatan benda uji mortar dilakukan pada suhu ruang sekitar 24-27°C selama 7 hari dan 28 hari.

### 3.6 Pelaksanaan Pengujian Benda Uji

Pelaksanaan pengujian benda uji dilakukan untuk menentukan kekuatan dan kualitas benda uji. Pengujian yang dilakukan berupa pengujian sifat mekanik, yaitu kuat tekan. Kuat tekan diuji pada umur 7 hari dan 28 hari perawatan suhu ruang. Pengujian kuat tekan mortar berdasarkan SNI 03-6825-2002 [10] bertujuan untuk mengetahui gaya maksimum per satuan luas benda uji mortar berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm.

Prosedur pengujian dimulai setelah 7 hari dan 28 hari perawatan suhu ruang, kemudian menimbangnnya. Selanjutnya, meletakkan benda uji sesuai posisi pada kerangka alat uji tekan mortar. Catat beban maksimum yang terjadi selama pengujian dan hitung kuat tekan beton, yaitu beban maksimum per satuan luas permukaan mortar.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Karakteristik agregat halus ini diuji di Laboratorium Teknologi Bahan, Teknik Sipil, Universitas Riau. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik agregat yang digunakan sebagai material penyusun beton geopolimer *hybrid*. Agregat halus berasal dari Sungai Teratak Buluh, Kampar. Hasil pengujian karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

No.	Jenis pengujian	Hasil	Spesifikasi	Satuan
1.	Modulus kehalusan	2,94	1,50 - 3,80	-
2.	Kadar air	2,20	3 - 5	%
	Berat jenis			
3.	a. <i>Bulk Specific Gravity on SSD</i>	2,65	2,56 - 2,86	-
	b. <i>Absorption</i>	2,46	2 - 7	%
	Berat volume			
4.	a. Keadaan padat	1,72	1,40 - 1,90	gr/cm <sup>3</sup>
	b. Keadaan gembur	1,63	1,40 - 1,90	gr/cm <sup>3</sup>
5.	Kadar lumpur	0,85	< 5	%
6.	Kadar organik	No. 1	< No. 3	-

Pada Tabel 6 dapat dilihat hasil pengujian karakteristik agregat halus yang digunakan memiliki nilai modulus kehalusan sebesar 2,94 yang memenuhi standar spesifikasi, yaitu 1,50-3,80. Nilai kadar air diperoleh sebesar 2,20% belum memenuhi standar spesifikasi yang

disyaratkan, yaitu 3-5%. Hal tersebut dikarenakan agregat halus dalam kondisi yang kering. Nilai *bulk specific gravity on SSD* dan *absorption* yang diperoleh sebesar 2,65 dan 2,46%. Nilai *bulk specific gravity on SSD* telah memenuhi standar spesifikasi yang disyaratkan, yaitu 2,58-2,86 dan *absorption* juga telah memenuhi standar spesifikasi, yaitu 2-7%. Nilai berat volume yang diperoleh sebesar 1,72 gr/cm<sup>3</sup> dalam keadaan padat dan 1,63 gr/cm<sup>3</sup> dalam keadaan gembur. Nilai berat volume dalam kondisi padat dan berat volume dalam kondisi gembur telah memenuhi standar spesifikasi yang disyaratkan, yaitu 1,40-1,90 gr/cm<sup>3</sup>. Selain itu, agregat halus ini memiliki nilai kadar lumpur sebesar 0,85% telah memenuhi standar spesifikasi, yaitu <5%. Kadar organik pada agregat halus ini diperoleh warna No.1. Warna ini telah memenuhi standar spesifikasi, yaitu <No.3. Secara keseluruhan, agregat halus ini memiliki kualitas baik karena telah memenuhi standar spesifikasi, tetapi jumlah kadar air tergolong kecil karena dalam kondisi yang kering.

### 4.2 Hasil Pengujian Karakteristik Abu Terbang

Pengujian karakteristik abu terbang pada penelitian ini dilakukan di PT. Sucofindo di Pekanbaru. Pengujian karakteristik abu terbang dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur kimia yang terkandung di dalam abu terbang tersebut. Abu terbang diuji dalam kondisi kering dan lolos saringan No. 100 (0,15 mm). Abu terbang ini berasal dari PLTU Ombilin, Padang, Sumatera Barat. Hasil pengujian abu terbang dapat dilihat pada Tabel 7 berikut.

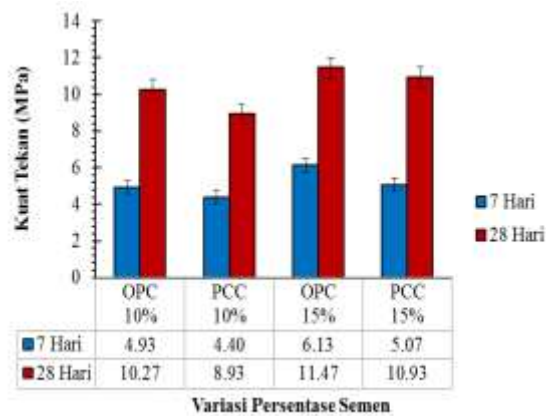
Tabel 7. Hasil Pengujian Karakteristik Abu Terbang

Parameter uji	Satuan	Hasil analisa
<i>Loss on Ignition (LOI)</i>	%	18,98
SiO <sub>2</sub>	%	59,25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	29,25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	5,45
TiO <sub>2</sub>	%	0,83
CaO	%	1,54
MgO	%	0,31
K <sub>2</sub> O	%	2,23
Na <sub>2</sub> O	%	0,68
SO <sub>3</sub>	%	0,29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,04
MnO <sub>2</sub>	%	0,01

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik kimia abu terbang PLTU Ombilin, Padang, Sumatera Barat didapat abu terbang mengandung SiO<sub>2</sub> sebesar 59,25%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 29,25% dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 5,45%. Hasil ini menunjukkan abu terbang PLTU Ombilin tergolong kelas F karena SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 70% [3]. Abu terbang kelas F memiliki kalsium yang rendah dan dapat dimanfaatkan sebagai material geopolimer. Akan tetapi, abu terbang ini memiliki nilai LOI tinggi, yaitu 18,98% yang melebihi standar ASTM maksimal 12%. LOI merupakan kadar karbon yang tidak terbakar. Jumlah LOI

tergantung dari operasi pembakaran dan penggilingan batu bara, semakin banyak jumlah LOI maka abu terbang kurang reaktif karena mengandung karbon yang dapat menghambat jalannya reaksi geopolimer [23].

#### 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan

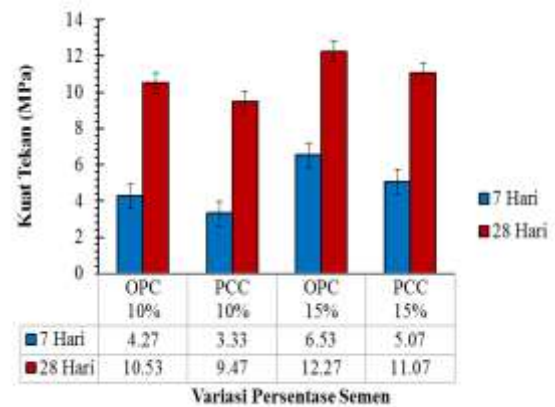


Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Berdasarkan Variasi Persentase Semen dengan NaOH 10M dan Ms 1,5

Pada Gambar 3 didapat hasil kuat tekan mortar geopolimer *hybrid* dengan variasi persentase semen menggunakan NaOH 10M dan Ms 1,5. Hasil kuat tekan meningkat dengan bertambahnya persentase OPC atau PCC yang digunakan. Pada umur 7 hari, didapat kuat tekan tertinggi pada mortar geopolimer *hybrid* OPC 15% dan PCC 15% masing-masing, yaitu 6,13 MPa dan 5,07 MPa. Setelah umur 28 hari, didapat kuat tekan mortar tertinggi juga pada variasi persentase semen 15%, yaitu mortar geopolimer *hybrid* OPC mencapai 11,47 MPa dan mortar geopolimer *hybrid* PCC mencapai 10,93 MPa. Namun, dapat dilihat kuat tekan mortar geopolimer *hybrid* menggunakan OPC memiliki hasil yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan PCC. Hal ini diakibatkan kandungan Ca (kalsium) yang lebih banyak pada OPC dibandingkan PCC. Berdasarkan penelitian Pradana et al. [24] juga menunjukkan penggunaan OPC memiliki karakteristik kekuatan awal yang lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan PCC.

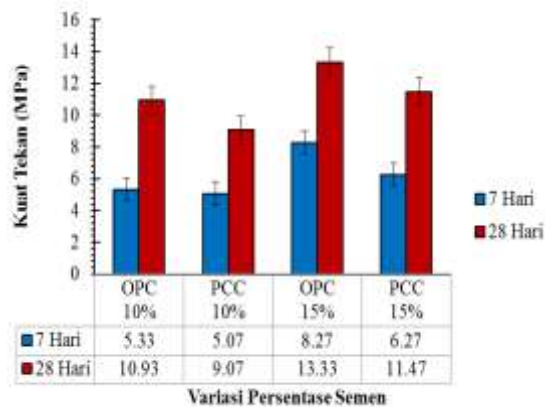
Gambar 4 menunjukkan hasil kuat tekan mortar geopolimer *hybrid* dengan variasi persentase semen menggunakan NaOH 12M dan Ms 1,5. Hasil kuat tekan juga meningkat dengan bertambahnya persentase OPC atau PCC yang digunakan sesuai dengan hasil mix 1. Pada umur 7 hari, didapat kuat tekan tertinggi pada mortar geopolimer *hybrid* OPC 15% dan PCC 15% masing-masing, yaitu 6,53 MPa dan 5,07 MPa. Setelah umur 28 hari, didapat kuat tekan mortar tertinggi juga pada variasi persentase semen 15%, yaitu mortar geopolimer *hybrid* OPC mencapai 12,27 MPa dan mortar geopolimer *hybrid* PCC mencapai 11,07 MPa. Namun, dapat dilihat mortar geopolimer *hybrid* menggunakan NaOH 12M memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan mortar menggunakan NaOH 10M pada mix 1. Hasil mix ini

sesuai dengan penelitian [25] yang menunjukkan reaksi geopolimer dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH. Semakin meningkat konsentrasi NaOH, maka semakin meningkatkan kekuatan geopolimer. Namun, jika konsentrasi NaOH berlebihan akan mengganggu proses reaksi sehingga ion OH<sup>-</sup> tidak efektif untuk meningkatkan kekuatan. Penelitian Bakri et al. [26] juga menunjukkan konsentrasi NaOH *moderate* (sedang) seperti 10M dan 12M mencapai kekuatan yang optimum daripada konsentrasi NaOH yang lain.



Gambar 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Berdasarkan Variasi Persentase Semen dengan NaOH 12M dan Ms 1,5

Berdasarkan Gambar 5 didapat hasil kuat tekan mortar geopolimer *hybrid* dengan variasi persentase semen menggunakan NaOH 10M dan Ms 2,5. Hasil kuat tekan juga meningkat dengan bertambahnya persentase OPC atau PCC yang digunakan sesuai dengan hasil mix 1 dan 2. Pada umur 7 hari, didapat kuat tekan tertinggi pada mortar geopolimer *hybrid* OPC 15% dan PCC 15% masing-masing, yaitu 8,27 MPa dan 6,27 MPa. Setelah umur 28 hari, didapat kuat tekan mortar tertinggi juga pada variasi persentase semen 15%, yaitu mortar geopolimer *hybrid* OPC mencapai 13,33 MPa dan mortar geopolimer *hybrid* PCC mencapai 11,47 MPa. Namun, dapat dilihat mortar geopolimer *hybrid* menggunakan Ms 2,5 memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan mortar menggunakan Ms 1,5 pada mix 1 dan 2. Peningkatan rasio modulus Ms akan meningkatkan kuantitas dari Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (sodium silikat). Rasio modulus perbandingan antara Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH yang terlalu tinggi akan mengurangi kuantitas dari NaOH mengakibatkan kekuatan geopolimer menurun. Namun, begitu sebaliknya jika rasio modulus terlalu rendah akan meningkatkan kuantitas dari NaOH sehingga mengakibatkan produksi ion OH<sup>-</sup> yang berlebihan. Berdasarkan penelitian Joseph & Mathew [27] juga menunjukkan kekuatan optimum campuran geopolimer menggunakan rasio modulus Ms *moderate* (sedang) seperti 2 dan 2,5.



Gambar 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Berdasarkan Variasi Persentase Semen dengan NaOH 10M dan Ms 2,5

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan terhadap penelitian mortar geopolimer abu terbang *hybrid* maka didapat kesimpulan sebagai berikut.

1. Abu terbang dari PLTU Ombilin Padang bersifat rendah kalsium dan tinggi silika. Abu terbang PLTU Ombilin tergolong kelas F karena  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ . Oleh karena itu, berpotensi digunakan untuk material geopolimer.
2. Agregat halus berasal dari Sungai Teratak Buluh, Kabupaten Kampar berkarakteristik baik dan memenuhi standar yang telah ditetapkan.
3. Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer abu terbang *hybrid* menggunakan *Portland Composite Cement* (PCC) memiliki kekuatan yang lebih rendah dibandingkan menggunakan *Ordinary Portland Cement* (OPC). Mortar geopolimer *hybrid* dengan penggantian 15% semen lebih tinggi dibandingkan dengan penggantian 10% semen. Hasil optimum pada mortar geopolimer *hybrid* OPC dengan penggantian 15% umur 7 hari dan 28 hari, yaitu 6,13 MPa dan 11,47 MPa. Sedangkan, mortar geopolimer *hybrid* PCC dengan penggantian 15% umur 7 hari dan 28 hari, yaitu 5,07 MPa dan 10,93 MPa.
4. Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer abu terbang *hybrid* menggunakan NaOH 12M memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan NaOH 10M. Namun, hasil optimum tetap pada mortar geopolimer *hybrid* OPC dengan penggantian 15% semen umur 7 hari dan 28 hari, yaitu 6,53 MPa dan 12,27 MPa. Sedangkan, pada mortar geopolimer *hybrid* PCC dengan penggantian 15% semen umur 7 hari dan 28 hari, yaitu 5,07 MPa dan 11,07 MPa.
5. Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer abu terbang *hybrid* menggunakan rasio modulus Ms 2,5 memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan rasio modulus Ms 1,5. Namun, hasil optimum tetap pada mortar geopolimer *hybrid* OPC

dengan penggantian 15% semen umur 7 hari dan 28 hari, yaitu 8,27 MPa dan 13,33 MPa. Sedangkan, pada mortar geopolimer *hybrid* PCC dengan penggantian 15% semen umur 7 hari dan 28 hari, yaitu 6,27 MPa dan 11,47 MPa.

6. Dapat disimpulkan dari seluruh hasil pengujian, kuat tekan optimum mortar geopolimer abu terbang *hybrid* adalah variasi NaOH 10M, Ms 2,5 dan penggantian sebagian abu terbang dengan semen sebesar 15%.

### 5.2 Saran

Saran untuk penelitian mortar geopolimer abu terbang *hybrid* ini adalah sebagai berikut.

1. Perlu diuji lebih lanjut hingga umur benda uji 91 hari bahkan 120 hari agar data yang dihasilkan lebih baik.
2. Masa perawatan suhu ruang sebaiknya menggunakan desikator agar suhu ruang tetap stabil.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Pemerintah No 101 Tahun 2014, "Pengelolaan limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)," 2014.
- [2] Kementerian ESDM, "Laporan kinerja Kementerian ESDM 2016," 2016.
- [3] ASTM C-618 2005, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use," 2005.
- [4] Julharmito, A. Fadli, and Drastinawati, "Pemanfaatan limbah abu terbang (fly ash) batubara sebagai bahan campuran beton geopolimer," *JOM FTeknik*, vol. 2, pp. 1–7, 2015.
- [5] J. Davidovits, "Properties of geopolymer cements," *Sci. Res. Inst. Bind. Mater.*, pp. 1–19, 1994.
- [6] G. Habert, J. B. D'Espinose De Lacaillerie, and N. Roussel, "An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, pp. 1229–1238, 2011.
- [7] P. Nath, P. Kumar, and V. B. Rangan, "Early age properties of low-calcium fly ash geopolymer concrete suitable for ambient curing," *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 601–607, 2015.
- [8] J. M. Mejía, E. Rodríguez, R. Mejía De Gutiérrez, and N. Gallego, "Preparation and characterization of a hybrid alkaline binder based on a fly ash with no commercial value," *J. Clean. Prod.*, vol. 104, no. June, pp. 346–352, 2015.
- [9] I. García-lodeiro, S. Donatello, A. Fernández-jiménez, and Á. Palomo, "Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: hydration of hybrid alkaline cement



- containing a very large proportion of fly ash,” *Materials (Basel)*, no. July, 2016.
- [10] SNI 03-6825-2002, “Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen Portland untuk pekerjaan sipil,” 2002.
- [11] R. Manuahe, M. D. J. Sumajouw, and R. S. Windah, “Kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar abu terbang (fly ash),” *J. Sipil Statik*, vol. 2, pp. 277–282, 2014.
- [12] A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, and M. Criado, “Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model,” vol. 35, pp. 1204–1209, 2005.
- [13] I. Garcia-Lodeiro, A. Fernández-Jimenez, and A. Palomo, “Cements with a low clinker content: versatile use of raw materials,” *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 4, no. June, pp. 37–41, 2015.
- [14] SNI 03-1968-1990, “Metode pengujian tentang analisis saringan agregat halus dan kasar,” 1990.
- [15] M. Munir, “Pemanfaatan abu batubara (fly ash) untuk hollow block yang bermutu dan aman bagi lingkungan,” Surabaya, 2008.
- [16] D. Hardjito and B. V Rangan, “Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete,” 2005.
- [17] ASTM C-150 2014, “Standard specification for Portland cement,” 2014.
- [18] SNI 7974-2013, “Spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis,” 2013.
- [19] L. N. Assi, E. Eddie, M. K. Elbatanouny, and P. Ziehl, “Investigation of early compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 807–815, 2016.
- [20] H. Kasyanto, “Tinjauan kuat tekan geopolimer berbahan dasar fly ash dengan aktivator sodium hidroksida dan sodium silikat,” 2012.
- [21] R. I. A. Utami and B. Herbudiman, “Efek tipe superplasticizer terhadap sifat beton segar dan beton keras pada beton geopolimer berbasis fly ash,” vol. 3, pp. 1–12, 2017.
- [22] I. M. A. K. Salain, “Karakteristik beton semen Portland,” *Tekno. dan Kejur.*, vol. 32, pp. 63–70, 2009.
- [23] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V Rangan, “Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete,” *Civ. Eng. Dimens.*, vol. 6, pp. 88–93, 2007.
- [24] T. Pradana, M. Olivia, and I. R. Sitompul, “Kuat tekan dan porositas beton semen OPC, PCC, dan OPC POFA di lingkungan gambut,” *Jom FTEKNIK*, vol. 3, p. 8, 2016.
- [25] S. Khan, N. Shafiq, and T. Ayub, “Effect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete,” vol. 8, pp. 44–56, 2013.
- [26] Bakri, A. M. M. Al, H. Kamarudin, I. K. Bnhussain, M., Nizar, and A. R. Rafiza, “Microstructure of different NaOH molarity of fly ash- based green polymeric cement,” *Procedia Eng.*, vol. 3, pp. 44–49, 2011.
- [27] B. Joseph and G. Mathew, “Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete,” *Sci. Iran.*, vol. 19, pp. 1188–1194, 2012.