

PENGARUH VARIASI PENAMBAHAN NAOH PADA KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER ABU TERBANG DENGAN OPC SEBAGAI TAMBAHAN

Ferisma Ratu Giri¹⁾, Monita Olivia²⁾, Iskandar Romey Sitompul²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, fakultas Teknik, Universitas Riau

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

Email: ferisma.ratugiri@student.unri.ac.id

ABSTRACT

This study investigates the effect of NaOH molarity on geopolymer mortar with Ordinary Portland Cement in addition to geopolymer mortar. The intent of using Ordinary Portland Cement is to produce hybrid geopolymer concrete which can harden without high temperatures. Mortar was treated at room temperature (20-25 °C), then testing after mortars aged 7 and 28 days. The variation of molarity of NaOH used was 10 M, 12 M, and 14 M, while the ratio of silicate modulus, Ms (Na₂SiO₃ / NaOH) and the percentage of OPC added to the mixture were 2,5 and 15% of the weight of fly ash, respectively compressive test was conducted to the specimens. The results showed that mortar with 12M NaOH had a compressive strength of 15,47 MPa, while the compressive strength of specimens with 8M, 10M, 14M and 16M were 10,93 MPa, 14 MPa, 13,20 MPa and 10,67 MPa, respectively. The optimal compressive strength is obtained on addition 12M NaOH.

Keywords: Compressive strength testing, geopolymer, hybrid geopolymer, mortar, NaOH molarity, silicate modulus ratio, ordinary portland cement..

A. PENDAHULUAN

Menurut Davidovits (1994), pada saat memproduksi satu ton *Ordinary Portland Cement* (OPC) pada saat yang sama menghasilkan emisi gas CO₂ satu ton pula. Ramezaniapour (2014) menambahkan industri semen dan konstruksi turut menyumbang peningkatan pemanasan global sebesar 7% dari total emisi gas CO₂ dunia. Kemudian, ditahun yang sama Davidovits (1994) menemukan sebuah material yang berperan sebagai polimer alumina silikat inorganik yang disintesa dari bahan silika dan aluminium. Bahan tersebut dapat diperoleh dari material alami ataupun limbah industri seperti abu terbang, abu sawit, dan abu sekam, material tersebut dapat dijadikan bahan alternatif pengganti semen atau dikenal dengan istilah geopolimer. Penemuan geopolimer

menjadi salah satu solusi dalam mengurangi semen konvensional dan mengurangi emisi gas CO₂.

Abu terbang dipilih sebagai pengganti semen dan bahan utama geopolimer selain karena mengandung zat pengikat pengganti semen, juga karena setiap satu ton batu bara yang dibakar akan menghasilkan limbah berupa abu terbang sebesar 15-17% (Endah Safitri, 2009). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 85 Tahun 1999 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, abu terbang dikategorikan sebagai Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Limbah B3 apabila tidak diolah dengan baik dapat membahayakan kesehatan atau kelangsungan hidup manusia, makhluk lain, dan atau lingkungan hidup.

Abu terbang memiliki bentuk partikel yang bulat sehingga membantu meningkatkan *workability* pada beton segar sementara itu ukuran partikelnya yang amat kecil berperan sebagai pengisi lubang pada beton sehingga menghasilkan beton geopolimer yang padat dan tahan lama (Hardjito, 2005).

Beton geopolimer memiliki kelemahan yaitu membutuhkan proses *curing* suhu tinggi (85-100 °C), memakai energi, dan sulit untuk diterapkan di lapangan khususnya pada kondisi pengecoran *cast-insitu* (Nath et al., 2015). Dibuatlah beton geopolimer abu terbang hibrid. Beton geopolimer abu terbang hibrid adalah pencampuran semen dengan beton geopolimer abu terbang dengan komposisi semen kurang dari 30% . Penggunaan semen pada mortar geopolimer abu terbang di penelitian ini adalah sebagai tambahan.

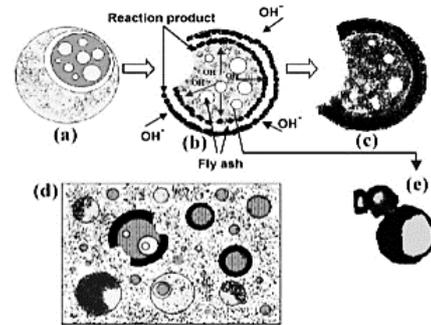
Beton geopolimer abu terbang hibrid merupakan inovasi beton yang tidak hanya dapat mengeras tanpa suhu tinggi, namun juga dapat bertahan di lingkungan yang agresif terhadap beton konvensional seperti lingkungan asam dan lingkungan yang mengandung klorida seperti air laut, serta dapat mengurangi penggunaan semen, dan memanfaatkan limbah berbahaya yaitu abu terbang.

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Mortar Geopolimer Abu Terbang

Reaksi geopolimerisasi pada abu terbang dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya faktor komposisi kimia dari abu terbang dan tingkat kepekatan NaOH. Faktor lainnya yang mempengaruhi reaksi geopolimerisasi adalah rasio modulus silikat serta rasio alkali terhadap abu terbang, suhu pada saat *curing* beton, durasi serta kelembaban geopolimer abu terbang (Assi et al., 2016).

Tahap reaksi larutan alkali aktivator dengan abu terbang dijelaskan oleh Fernandez-Jimenez et al. (2005) dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahap Reaksi Larutan Alkali Aktivator dengan Abu Terbang

Sumber : (Fernandez-Jimenez et al. 2005)

Tahap awal reaksi geopolimerisasi yaitu pemutusan partikel abu terbang oleh ion hidroksida OH^- serta proses pengikatan polimerisasi. Pemutusan partikel abu terbang dimulai dengan reaksi kimia ion OH^- dari larutan alkali aktivator ke permukaan abu terbang. Reaksi berlanjut ke bagian dalam dan bergerak ke arah luar secara bersamaan hingga seluruh ataupun sebagian abu terbang bereaksi. Reaksi dari alkali aktivator berlanjut hingga bagian partikel terkecil. Hal lain yang terjadi adalah terbentuknya lapisan penghambat dari bulatan-bulatan kecil yang tidak bereaksi dengan alkali. Pada tahap akhir akan terbentuk susunan geopolimer yang merupakan hasil reaksi dari abu terbang secara sempurna, hanya sebagian partikel abu terbang yang tidak bereaksi.

B.2 Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid

Perawatan Mortar geopolimer abu terbang biasanya harus dilakukan dengan suhu tinggi. Penggunaan *ordinary portland cement* sebagai tambahan pada *binder* abu terbang bertujuan agar perawatan mortar geopolimer dapat dilakukan pada suhu ruang. Penggunaan semen tersebut bertujuan untuk memanfaatkan panas eksotermis yang dihasilkan dari reaksi hidrasi untuk membantu proses polimerisasi pada mortar geopolimer di suhu ruang (Nath & Sarker, 2014).

Proses terbentuknya mortar geopolimer abu terbang hibrid yaitu pada saat semen seperti *Ordinary Portland*

Cement bertemu dengan air, gel yang terbentuk berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H). Namun, pada saat abu terbang bertemu dengan larutan alkali aktivator gel yang terbentuk berupa aluminosilikat. Sehingga apabila *binder* geopolimer abu terbang yang telah dicampur dengan alkali aktivator kemudian bertemu dengan semen, maka *binder* yang dihasilkan berupa kalium silikat hidrat (C-A-S-H), gel inilah yang berperan supaya beton geopolimer hibrid dapat mengeras tanpa suhu tinggi.

B.3 Bahan Penyusun Mortar Geopolimer Abu Terbang Hibrid

Bahan penyusun mortar geopolimer *hybrid* adalah, abu terbang, agregat halus, alkali aktivator, *superplasticizer*, dan *ordinary portland cement* (OPC),.

B.3.1 Abu Terbang

Proses pembakaran batu bara menghasilkan 5% polutan abu padat dengan sekitar 80-90% total jumlah abu terbang dan 10-20% berupa abu dasar. Abu terbang atau *fly ash* merupakan sisa hasil pembakaran batu bara yang biasa digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Abu terbang berbentuk partikel halus yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) dan bersifat pozzolanik karena mengandung silika (Si) dan alumina (Al) tetapi sangat sedikit mengandung kalsium (Ca). Abu terbang yang digunakan adalah tipe F, Karakteristik kimia abu terbang berdasarkan ASTM-C618-05 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Kimia Abu Terbang

No	Karakteristik Kimia	Kelas		
		N	F	C
1	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , minimal (%)	70	70	50
2	SO ₃ , maksimal (%)	4	5	5
3	Kadar kelembapan, maksimal (%)	3	3	3

No	Karakteristik Kimia	Kelas		
		N	F	C
4	Loss on ignition (LOI), maksimal (%)	10	12	6

Sumber: (ASTM-C618-05)

B.3.2 Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang ukuran butirnya lebih kecil dari 4,75 mm (standar ASTM) dan lebih besar dari 0,075 mm.

B.3.3 Alkali Aktivator

Reaksi polimerisasi yang terjadi pada beton geopolimer dibantu dengan larutan aktivator. Biasanya pada beton geopolimer digunakan *natrium silicate* (Na₂SiO₃) dan *natrium hydroxide* (NaOH). *Natrium silicate* berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Sedangkan *natrium hydroxide* berfungsi untuk mereaksikan unsur – unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang sehingga dihasilkan ikatan polimer yang kuat (Kasyanto, 2012). Pada penelitian ini digunakan dua jenis larutan aktivator :

1. Sodium Silikat (Na₂SiO₃)

Sodium Silikat biasa dikenal dengan sebutan *natrium metasilicate*, *waterglass*. Sodium silikat terdiri dari dua jenis yakni dalam bentuk padatan dan dalam bentuk larutan. Pada penelitian ini digunakan sodium silikat dalam bentuk larutan. Sodium silikat memiliki kekentalan yang tinggi sehingga berpengaruh terhadap *workability* geopolimer. Sodium silikat pada campuran geopolimer selain meningkatkan kuat tekan juga berguna sebagai perekat antar material sehingga membentuk pasta yang padat (Olivia, 2015).

Sodium silikat (Na₂SiO₃) yang digunakan berasal dari PT Sinar Sakti Kimia, Sukoharjo – Jawa Tengah. Tipe Na₂SiO₃ yang digunakan adalah tipe II dengan mol ratio sebesar 2,26. Propertis dari Na₂SiO₃, terlampir pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Propertis Sodium Silikat

Parameter Uji	Satuan	Hasil Analisis
SiO ₂	%	31,75
Na ₂ O	%	14,51
Total Solid	%	46,26
Mol Ratio		2,26
Density	Gr/MI	1,56
Baume	Be	52

2. Sodium Hidroksida / Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium Hidroksida merupakan sejenis basa logam kaustik. Sodium Hidroksida dapat membentuk suatu larutan alkali yang kuat jika dilarutkan ke dalam air. Natrium Hidroksida secara alami berbentuk padatan dan biasanya tersedia dalam bentuk serpihan, butiran ataupun larutan. Natrium Hidroksida larut dengan cepat di dalam air dan mampu melepaskan panas ketika dilarutkan, karena sewaktu pelarutannya dengan air zat tersebut bereaksi secara eksotermis.

Tabel 3. Kandungan NaOH Molaritas

Molaritas NaOH	Padatan (%)	H ₂ O (%)
8M	26,23	
10M	31,37	
12M	36,09	
14M	40,43	63,91
16M	44,44	59,57

Sumber : Hardjito (2005)

Tabel 3 mengindikasikan bahwa semakin tinggi molaritas pada larutan NaOH maka semakin banyak kandungan padatan NaOH di dalamnya.

B.3.4 Superplasticizer

Superplasticizer memiliki pengaruh yang besar untuk meningkatkan *workability*

beton dan sebagai bahan tambah yang berfungsi untuk menghasilkan beton yang mengalir tanpa terjadinya segregasi & *bleeding* pada beton dengan jumlah air yang besar (Utami & Herbudiman, 2017). *Superplasticizer* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Sikament tipe NN dari SIKA.

Dosis yang digunakan berkisar antara 1-2% dari berat *binder*.

B.3.5 Air

Penelitian ini digunakan air bersih Ph normal sebagai air pencampur pembuatan beton. Air tersebut memiliki nilai pH yang netral antara 6-8 serta memenuhi standar SNI 7974:2013 tentang spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis.

B.3.6 Semen

Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen tipe 1 atau *Ordinary Portland Cement* (OPC). Semen OPC memiliki berat jenis sebesar 3,15 gr/cm³. Semen OPC yang digunakan tidak dilakukan pengujian karena telah memenuhi syarat dari pabrik yang mengacu pada (ASTM C150) terkait semen portland normal (*ordinary portland cement*). Semen OPC digunakan sebagai penambahan pada campuran abu terbang sebesar 15% dari berat abu terbang yang digunakan.

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material yang dilakukan ialah pengujian agregat halus yang berasal dari Sungai Pagar, Teratak Buluh, Kampar.

C.2 Perencanaan dan Pembuatan Benda Uji

Perencanaan campuran dilakukan dengan metode absolute volume dengan mengasumsikan volume dari mortar padat sama dengan volume keseluruhan bahan pembuat mortar (Neville & Brooks, 2010). Material penyusun mortar geopolimer disiapkan dengan ketentuan rasio binder : pasir 1 : 3, rasio air/solid alkali 0,64.

Penelitian ini mengkaji dampak variasi molaritas NaOH yang digunakan pada mortar geopolimer. Variasi NaOH yang digunakan yaitu 8M, 10M, 12M, 14M dan 16M. Campuran geopolimer abu terbang hibrid juga menggunakan variasi Tetap yaitu Ms 2,5 dan OPC 15%. Pemilihan Ms 2,5 pada campuran berlandaskan pada penelitian Abdullah (2012) yang melakukan penelitian terhadap pasta geopolimer abu terbang dan menemukan bahwa rasio Ms 2,5 menghasilkan kuat tekan tertinggi yakni 57 Mpa. Penambahan OPC sebesar 15% dari berat abu terbang pada pasta geopolimer didasarkan pada hasil penelitian Rizaldi (2018) yang menyebutkan bahwa penggunaan OPC lebih dari 15% dapat menurunkan *workability* pada mortar.

Pencampuran mortar geopolimer abu terbang hibrid dilakukan cara manual. Pengadukan campuran mortar geopolimer abu terbang hibrid dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah mencampur agregat halus dengan abu terbang hingga merata, kemudian menambahkan larutan alkali aktivator dan dicampur hingga rata selama 4 menit. Setelah itu *Ordinary Portland Cement* ditambahkan dan dicampur rata selama 1 menit. Setelah tercampur rata, campuran mortar geopolimer dituang ke dalam cetakan.

Tabel 4. Perencanaan dan Pembuatan Benda Uji

Mix	NaOH	Ms	Aditif	Curing Suhu	
	(Molar)		OPC	Ruang (Hari)	
			(%)	7	28
Mix 1	8	2,5	15	3	3
Mix 2	10	2,5	15	3	3
Mix 3	12	2,5	15	3	3
Mix 4	14	2,5	15	3	3
Mix 5	16	2,5	15	3	3
Jumlah Sampel Mortar				15	15
Total				30	

Tabel 4 memperlihatkan jumlah keseluruhan sampel mortar yang direncanakan sebanyak 60 sampel dengan ukuran 50 mm × 50 mm × 50 mm.

C.3 Rest Periode dan Perawatan Suhu Ruang

Reaksi polimerisasi cenderung berjalan lambat hingga 0-5 hari. Rest periode diperlukan agar sampel mortar mengeras sebelum dibuka dari cetakan. Setelah dibuka dari cetakan mortar tersebut dilakukan perawatan dengan suhu ruang yakni berkisar 24-27°C

C.4 Pengujian Kuat Tekan Benda Uji

Kuat tekan beton merupakan besarnya beban per satuan luas yang dibebankan pada beton sebagai benda uji dengan gaya tekan tertentu oleh mesin uji tekan hingga mengalami kehancuran (SNI 1974:2011, 2011). Kuat tekan beton ($f'c$) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Dengan:

$f'c$: Kuat tekan mortar (MPa)

P : Beban aksial (N)

A : Luas permukaan benda uji (mm²)

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Hasil pengujian karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

No	Jenis pemeriksaan	Hasil uji	Standar spesifikasi
1	Kadar Lumpur	0,85	<5
2	Berat jenis (gr/cm ³)		
	a. <i>Apparent Specific gravity</i>	2,65	2,58-2,83
	b. <i>Bulk Specific gravity</i>	2,64	2,58-2,83
	c. <i>Bulk Specific gravity (ssd)</i>	2,65	2,58-2,83
	d. Absorption (%)	0,20	2,00-7,00

No	Jenis pemeriksaan	Hasil uji	Standar spesifikasi
3	Kadar Air (%)	0,15	3,00-5,00
4	Modulus Kehalusan	2,94	1,50-3,80
5	Berat Volume (gr/cm ³)		
	a. Kondisi Gembur	1,63	1,40-1,90
	b. Kondisi Padat	1,72	1,40-1,90

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai kadar lumpur sebesar 0,85. Nilai berat jenis SSD atau kering permukaan agregat halus yang digunakan yakni 2,65. Modulus kehalusan sebesar 2,94. Nilai berat volume yang diuji pada kondisi padat sebesar 1,72 dan gembur sebesar 1,63.

D.2 Hasil Pengujian Abu Terbang

Hasil pengujian karakteristik abu terbang dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Komposisi Kimia Abu Terbang

Parameter Uji	Satuan	Hasil Analisa
LOI	%	18,98
SiO ₂	%	59,25
Al ₂ O ₃	%	29,25
Fe ₂ O ₃	%	5,45
CaO	%	1,54
MgO	%	0,31
K ₂ O	%	2,23
Na ₂ O	%	0,68
P ₂ O ₅	%	0,04
SO ₃	%	0,29

Sumber: (Balai Riset dan Standardisasi Industri Padang, 2019)

Pada Tabel 6. di atas, diketahui bahwa abu terbang memiliki kandungan Silika (SiO₂) sebesar 59,25% dan Alumina (Al₂O₃) sebesar 29,25%. Kandungan Silika pada abu terbang ini merupakan kandungan yang paling dominan. Hal ini menunjukkan bahwa abu terbang yang digunakan dalam

penelitian ini memenuhi syarat menjadi bahan *pozzolan*.

D.3 Hasil Pengujian Air Gambut

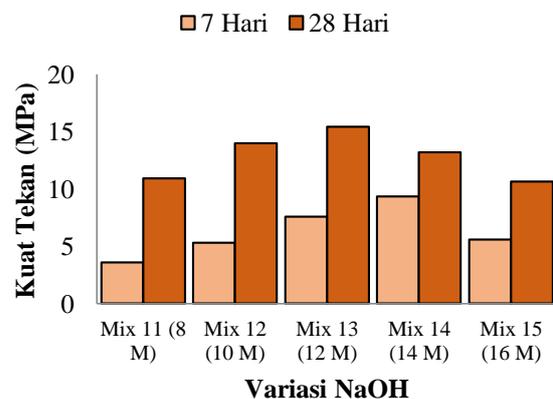
Tabel 7 menunjukkan hasil uji kandungan kimiawi air gambut. Dapat diketahui bahwa air gambut yang digunakan sebagai air perendaman pada penelitian ini memiliki pH 5,01 sehingga bersifat asam.

Tabel 7. Kandungan Air Gambut

No	Parameter uji	Satuan	Hasil analisa
1	Warna	TCU	34,60
2	Kekeruhan	NTU	15,90
3	Besi	mg/l	0,8845
4	Kesadahan	mg/l	4,59
5	Khlorida	mg/l	2,34
6	Mangan	mg/l	0,2321
7	Ph	-	5,01
8	Sulfat	mg/l	68,20
9	Zat Organik (KMnO ₄)	mg/l	28,38
10	DHL	µs/cm	7,46

Sumber: (Balai Riset dan Standardisasi Industri Padang, 2019)

D.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan



Gambar 2. Hasil Uji Kuat Tekan Variasi Molaritas NaOH

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan variasi molaritas NaOH ditunjukkan pada Gambar 2. Mortar geopolimer dengan NaOH 12 Molar memiliki nilai kuat tekan tertinggi dibanding dengan penggunaan NaOH 8 Molar, 10 Molar, 14 Molar dan 16 Molar.

Nilai kuat tekan mortar geopolimer dengan NaOH 12 Molar pada umur 28 hari *curing* suhu ruang sebesar 15,47 MPa. Sementara nilai kuat tekan pada beton geopolimer dengan menggunakan NaOH 8 Molar, 10 Molar, 14 Molar dan 16 Molar secara berturut-turut adalah 10,93 MPa, 14 MPa, 13,20 MPa, dan 10,67 MPa.

Kandungan silika dan alumina pada abu terbang harus diuraikan pada saat proses geopolimerisasi dan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH. Semakin tinggi molaritas larutan NaOH yang digunakan pada beton hibrid maka semakin cepat reaksi geopolimerisasi yang terjadi dan mempercepat proses pemisahan kandungan aktif pada abu terbang sehingga menghasilkan lebih banyak jaringan gel geopolimer. Hal demikian, menyebabkan beton menjadi semakin kuat. Namun, apabila terlalu tingginya molaritas NaOH yang digunakan maka menghasilkan proses geopolimerisasi terlalu cepat sehingga mengganggu proses geopolimerisasi karena jumlah ion OH⁻ yang terbentuk terlalu berlebihan dan menyebabkan reaksi geopolimerisasi tidak efisien sehingga peningkatan kuat tekan beton terhambat (Hamidi et al., 2016).

E. KESIMPULAN DAN SARAN

E.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer hibrid yang dirawat disuhu ruang maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi NaOH 12M menghasilkan kuat tekan mortar geopolimer abu terbang hibrid tertinggi, molaritas lebih dari 12M menghasilkan kuat tekan lebih rendah pada umur 28 hari pengujian.
2. Penelitian ini membuktikan bahwa mortar geopolimer abu terbang hibrid dengan OPC sebagai tambahan menghasilkan mortar yang dapat mengeras tanpa suhu tinggi.

E.2 Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan menggunakan jenis abu terbang (fly ash) yang berbeda dari PLTU lain.
2. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan umur perawatan yang lebih lama hingga 180 hari, agar mendapatkan data yang lebih rinci.
3. Perawatan pada suhu ruang sebaiknya menggunakan wadah desikator agar suhu ruangan yang digunakan tetap stabil.

Daftar Pustaka

- Assi, L. N., Eddie, E., Elbatanouny, M. K., & Ziehl, P. (2016). Investigation Of Early Compressive Strength Of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Construction & Building Materials*, *112*, 807–815. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.008>
- ASTM-C618-05. (2007). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use*.
- ASTM C150-15. (2007). *Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standards*, *552*, 1–8.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, (November), 131–149.
- Endah Safitri, D. (2009). Kajian Teknis dan Ekonomis Pemanfaatan Limbah Batu Bara (Fly ash) pada produksi Paving Block. *Media Teknik Sipil*, *IX*, 36–40.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). *Microstructure Development Of Alkali-Activated Fly Ash Cement : a Descriptive Model*. *35*, 1204–1209. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021>
- Hamidi, R. M., Man, Z., & Azizli, K. A. (2016). Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash

- Based Geopolymer. *Procedia Engineering*, 148, 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.568>
- Hardjito, D. (2005). *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. (November).
- Indonesia, P. P. R. (1999). *Peraturan Pemerintah No . 85 Tahun 1999 Tentang : Perubahan Atas Peraturan Pemerintah No . 18 Tahun 1999 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya*. (85).
- Kasyanto, H. (2012). *Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Dan Sodium Silikat*.
- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Binhussain, M., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2012). Effect of Na₂SiO₃/NaOH ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly-ash-based geopolymer. *ACI Materials Journal*, 109(5), 503–508.
- Nath, P., Sarker, P. K., & Rangan, V. B. (2015). Early age properties of low-calcium fly ash geopolymer concrete suitable for ambient curing. *Procedia Engineering*, 125, 601–607. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.077>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology (Second Edition)* (2nd ed.).
- Olivia, M. (2015). Geopolimer sebagai Material Infrastruktur Berkelanjutan di Lingkungan Gambut. *Annual Civil Engineering Seminar*, 6.
- Ramezaniapour, A. A. (2014). Cement Replacement Materials; Properties, Durability, Sustainability. In *Springer Geochemistry/Mineralogy*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>
- SNI 1974:2011. (2011). Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. In *Badan Standardisasi Nasional*.
- SNI 7974:2013. (2013). *Spesifikasi air pencampur yang digunakan dalam produksi beton semen hidraulis*. Bandung: Badan Standar Nasional.
- Utami, R. I. A., & Herbudiman, B. (2017). *Efek Tipe Superplasticizer terhadap Sifat Beton Segar dan Beton Keras pada Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash*. 3(1), 1–12.