

PENGARUH PERSENTASE SEMEN OPC TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER ABU TERBANG DENGAN PERAWATAN SUHU RUANG

Rudy Satriya Pratama¹⁾, Alfian Kamaldi²⁾, Monita Olivia²⁾

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

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

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

Email: rudy.satriya@student.unri.ac.id

Abstract

Geopolymers are environmentally friendly materials that utilize inorganic industrial waste rich in silica and alumina such as fly ash which is reacted with alkaline solutions. This study examined the effect of the percentage of Ordinary Portland Cement used as a partial substitute for fly ash against the compressive strength of mortar. The variation in the percentage of OPC used was 5%, 10%, 15%, 20% and 25%. The size of the mortar used was 50 mm × 50 mm × 50 mm. Tests on geopolymer mortar were carried out at 7, 14 and 28 days after the samples were cured under room temperature. The results showed the increase in the use of OPC would increase the compressive strength of geopolymer mortar. The use of OPC with 25% of the fly ash had a compressive strength of 11.2 MPa at 28 days after the samples were cured under room temperature. Furthermore, the compressive strength increased to 180% against the compressive strength of geopolymer mortar with the used 5% OPC. Mortar geopolymers with used of OPC 5%, 10%, 15%, and 20% had compressive strength 4 MPa, 8 MPa, 8 MPa, and 11.2 MPa after the samples were cured under room temperature. The conclusion obtained from this study was that the use of OPC of 25% as a substitute of fly ash in the geopolymer mortar was the optimum percentage which resulted in the maximum compressive strength.

Keywords: Mortar, geopolymer, fly ash, compressive strength, OPC cement

A. PENDAHULUAN

A.1 Latar Belakang

Mortar geopolimer merupakan mortar ramah lingkungan yang dibuat tanpa menggunakan semen. Mortar tersebut dibuat dengan memanfaatkan limbah industri yang kaya silika dan alumina yang telah diaktifkan terlebih dahulu menggunakan alkali aktivator.

Salah satu limbah industri yang dimanfaatkan sebagai pengganti semen pada beton geopolimer yakni abu terbang (*fly ash*). Abu terbang merupakan hasil

dari sisa pembakaran batu bara. Data Badan Pusat Statistik tahun 2016, menunjukkan Indonesia merupakan negara penghasil batu bara dengan jumlah produksi mencapai 405,9 juta ton pada tahun 2015. Pembakaran batu bara dapat menghasilkan abu terbang hingga 15-17 % setiap tonnya (Safitri, 2009).

Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan geopolimer di antaranya adalah karakteristik bahan dasar, dosis serta jenis larutan aktivator, *rest periode*, dan sistem

perawatan (*curing*) (Hardjito & Rangan, 2005).

Mortar geopolimer memiliki kelemahan yakni memerlukan suhu tinggi dalam proses *curing*. Hal ini dilakukan agar mendapatkan kekuatan mortar tinggi dan tidak menunggu waktu yang lama. Namun menyebabkan tidak efisiennya pengerjaan karena harus menggunakan pemanas (oven) dalam skala besar. Penggunaan semen OPC sebagai substitusi sebagian abu terbang dapat membantu proses ikatan agar lebih cepat dengan menggunakan *curing* suhu ruang. *Curing* suhu ruang juga memungkinkan aplikasi beton geopolimer secara *cast- in situ* (Nath & Sarker, 2014). Lebih lanjut Nath & Sarker (2014) menjelaskan penggunaan semen OPC sebesar 12% sebagai pengganti abu terbang menghasilkan kuat tekan sebesar 60 MPa atau meningkat sebesar 114% dibandingkan mortar geopolimer tanpa semen OPC yang memiliki kuat tekan sebesar 28 MPa.

A.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengkaji karakteristik kandungan abu terbang
2. Mengkaji Pengaruh persentase semen OPC terhadap kuat tekan mortar geopolimer

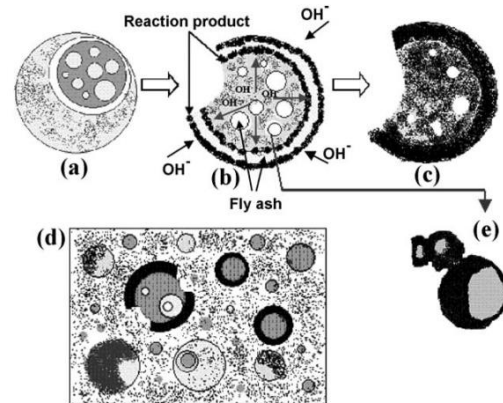
B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1 Mortar Geopolimer Abu Terbang

Geopolimer merupakan material ramah lingkungan yang terbentuk dari proses polimerisasi antara bahan kaya silika dan alumina dengan larutan alkali. (Davidovits, 1994).

Oleh karena itu, jenis larutan alkali dalam abu terbang dan juga komposisinya harus tepat sehingga bisa terjadi reaksi

kimia. Aktivator yang umumnya digunakan adalah Sodium Hidroksida 8 M sampai 14 M dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dengan perbandingan antara 0,4 sampai 2,5 terhadap berat NaOH (Hardjito, 2005).



Gambar 1. Proses Reaksi Larutan Alkali dengan Abu Terbang

Sumber: Fernandez-Jimenez et al. (2005)

Proses geopolimerisasi menurut Fernandez-Jimenez, Palomo, & Criado (2005) ditunjukkan pada Gambar 1. Pertama tahap 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 (Gambar 1.a dan 1.b). Setelah itu reaksi kimia berlanjut ke bagian dalam dan bergerak ke arah luar secara bersamaan hingga seluruh ataupun sebagian abu terbang bereaksi (Gambar 1.c). Reaksi dari alkali aktivator tersebut berlanjut hingga bagian partikel terkecil. Hal lain yang terjadi yakni 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,

sebagian serta partikel abu terbang yang tidak bereaksi.

Pada penelitian ini geopolimer abu terbang dibuat dalam bentuk mortar dengan bentuk kubus berukuran 50 mm × 50 mm × 50 mm. Mortar merupakan campuran antara semen, agregat halus dan air (SNI 15-2049-2004). Fungsi mortar memperkuat lekatan dan ketahanan ikatan dengan bagian-bagian penyusun konstruksi.

B.2 Bahan Penyusun Mortar Geopolimer Abu Terbang

B.2.1 Abu Terbang

Fly ash atau yang biasa dikenal sebagai abu terbang, merupakan sisa hasil pembakaran batu bara yang biasa digunakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Abu terbang berbentuk partikel halus serta bersifat pozzoland yang banyak mengandung silica (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), namun sangat sedikit mengandung kalsium (CaO). Pozolan dapat dipakai sebagai bahan tambahan atau sebagai pengganti sebagian semen portland. Bila dipakai sebagai pengganti sebagian semen portland umumnya berkisar antara 10% - 35% berat semen (Tjokrodimulyo, 1996).

Berdasarkan (Indonesia & Nasional, 2014) spesifikasi abu terbang sebagai bahan tambahan untuk campuran beton disebutkan ada 3 jenis abu terbang, yaitu :

- a. Abu terbang kelas F, adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara, jenis antrasit pada suhu 1560°C.
- b. Abu terbang kelas N, adalah hasil kalsinasi dari pozzolan alam seperti tanah diatonoce, shale (serpih), tuft, dan batu apung.
- c. Abu terbang kelas C adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran limit atau

batubara dengan kadar karbon ± 60 %. Abu terbang ini mempunyai sifat pozzolan dan sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10 %.

Pada penelitian ini abu terbang yang digunakan berasal dari PLTU Ombilin, Sumatera Barat. Abu terbang tersebut terlebih dahulu dikeringkan di dalam oven dengan suhu 80°C dan diayak menggunakan saringan no.200.

B.2.2 Agregat Halus

Agregat halus atau biasa disebut pasir adalah material yang butirannya lolos saringan No.4 atau diameter 4,75 mm. Menurut Adam (2009) kuantitas dari agregat bergantung terhadap rasio agregat dengan *binder*. Pada penelitian ini agregat halus yang digunakan berasal dari Sungai Pagar, Kampar. Agregat halus yang digunakan pada campuran mortar berada dalam kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD).

B.2.3 Alkali Aktivator

Reaksi polimerisasi yang terjadi pada geopolimer dibantu dengan larutan aktivator. Biasanya pada geopolimer digunakan *sodium silicate* (Na_2SiO_3) dan *sodium hydroxide* (NaOH). *Sodium silicate* berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Sedangkan *sodium 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 :

- a. *Sodium Silicate* (Na_2SiO_3)

Sodium Silicate biasa dikenal dengan sebutan *sodium metasilicate*, *waterglass* atau gelas cair. Sodium silikat terdiri dari dua jenis yakni dalam bentuk

padatan dan dalam bentuk larutan. Pada umumnya sodium silikat yang sering digunakan dalam campuran geopolimer adalah berbentuk 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, 2011)

Kombinasi atau campuran aktivator dari sodium silikat dan sodium hidroksida dapat memberikan pengaruh yang penting pada kekuatan beton. Modulus aktivator (MS) adalah perbandingan berat antara sodium silikat dan sodium hidroksida pada suatu larutan aktivator. Pada penelitian ini akan digunakan (MS) dengan nilai 2,5.

b. *Natrium Hydroxide* (NaOH)

Natrium hydroxide merupakan sejenis basa logam kaustik. *Natrium hydroxide* dapat membentuk suatu larutan alkali yang kuat jika dilarutkan kedalam air. *Natrium hydroxide* biasanya digunakan dalam bidang industri sebagai basa pada proses produksi kertas, sabun, tekstil, detergen, dan lain-lain.

Natrium hydroxide secara alami berbentuk padatan dan biasanya tersedia dalam bentuk serpihan, butiran ataupun larutan. Zat ini bersifat lembab cair dan secara langsung dapat menyerap karbondioksida dari udara bebas. *Natrium hydroxide* larut dengan cepat di dalam air dan mampu melepaskan panas ketika dilarutkan, karena sewaktu pelarutannya dengan air zat tersebut bereaksi secara eksotermis.

Tabel 1. Kandungan NaOH

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)

Pada tabel 1. menjelaskan berbagai jenis molaritas NaOH, persentase padatan yang terkandung di dalamnya, dan persentase H₂O. NaOH 12M memiliki padatan 36,09%. Penelitian ini menggunakan NaOH 12M.

B.2.4 Air

Air adalah material yang sangat diperlukan dalam pembuatan beton ataupun mortar. Air diperlukan dalam pembuatan beton atau mortar agar terjadi reaksi kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah pengerjaannya. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran mortar. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan-bahan kimia lain, bila dipakai untuk campuran mortar akan sangat menurunkan kekuatannya dan dapat juga mengubah sifat-sifat semen. Selain itu, air yang demikian dapat mengurangi afinitas antara agregat dengan pasta semen dan mungkin pula mempengaruhi kemudahan pengerjaan (Nawi, 1998).

Kuantitas penggunaan air terhadap solid alkali aktivator (w/s) pada geopolimer berkisar antara 0,37-0,66. Pada penelitian ini digunakan rasio w/s 0,60.

B.2.5 Semen OPC

Perawatan Mortar geopolimer abu terbang biasanya dilakukan dengan suhu tinggi. Penggunaan semen OPC sebagai pengganti 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). Pada penelitian ini digunakan variasi semen OPC yakni 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% dari berat abu terbang yang digunakan.

B.2.6 Superplasticizer

Superplasticizer merupakan bahan tambah yang digunakan untuk meningkatkan *workability* atau kemudahan dalam pengerjaan. Penggunaan *superplasticizer* juga bertujuan untuk mengurangi air pencampur yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi yang diinginkan dan meningkatkan nilai *slump*.

Pada penelitian ini *superplasticizer* yang digunakan adalah sikament NN yang berasal dari PT. Sika Indonesia. Dosis sikament NN yang digunakan yakni 1,5% dari berat abu terbang (Olivia & Nikraz, 2011).

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1 Pemeriksaan Material

Pemeriksaan material yang dilakukan terdiri dari pemeriksaan karakteristik agregat kasar dan halus serta komposisi kimia abu terbang.

Pemeriksaan agregat kasar dan halus dilakukan di Laboratorium Bahan

Bangunan, Teknik Sipil, Universitas Riau. Sedangkan pemeriksaan abu terbang dilakukan di Sucofindo, Pekanbaru.

C.2 Pelaksanaan Penelitian

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, rasio modulus aktivator ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) adalah 2, dan molaritas NaOH yang digunakan adalah 12M. Kemudian rasio alkali/abu terbang yang digunakan 0,64.

Variasi hanya dilakukan pada persentase semen OPC yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat abu terbang. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh penggunaan semen OPC terhadap kuat tekan mortar geopolimer tersebut.

Pencampuran mortar geopolimer abu terbang dilakukan dengan alat *mixer* mortar. Penggunaan alat ini bertujuan untuk mendapatkan adukan mortar yang merata. Pengadukan campuran mortar geopolimer dilakukan selama kurang lebih 5 menit dan setelah itu dilakukan pencetakan di dalam *mould*.

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

Berdasarkan ASTM C109M-02 kuat tekan beton adalah besarnya beban persatuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin uji tekan, dengan rumus:

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

dimana:

- $f'c$ = kuat tekan (MPa)
- P = beban maksimum (N)
- A = luas penampang (mm^2)

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Abu Terbang

Tabel 2. Komposisi Kimia *Fly Ash*

No	Unsur	Hasil (%)
1	SiO ₂	52,25
2	Al ₂ O ₃	29,25
3	Fe ₂ O ₃	5,45
4	MgO	0,31
5	CaO	1,54
6	Na ₂ O	0,68
7	P ₂ O ₅	0,04
8	SO ₃	0,29
9	LOI	18,98

Sumber: Sucofindo Pekanbaru (2018)

Berdasarkan data analisa abu terbang pada tabel 2, maka abu terbang yang digunakan tergolong pada kelas F. Hal ini sesuai dengan ASTM C 618 tentang klasifikasi abu terbang, dengan kadar SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ lebih dari 70% dan kadar SO₃ maksimum 5%. Kadar CaO pada abu terbang kurang dari 10%, hal ini menjelaskan bahwa abu terbang tersebut tergolong rendah kalsium.

D.2 Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat

Data hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 3.

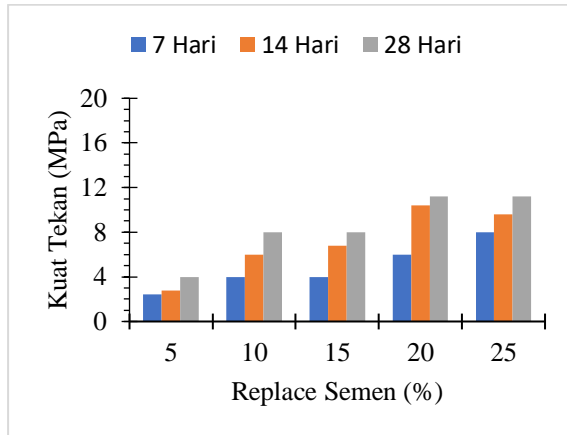
Tabel 3. Karakteristik Agregat Halus

No	Pengujian	Hasil	Spesifikasi		
1	Berat Jenis (gr/cm^3)	2,76	2,58 - 2,83		
	a. <i>Apparent Specific Gravity</i>				
	b. <i>Bulk Specific Gravity on dry</i>				
	c. <i>Bulk Specific Gravity on SSD</i>				
	d. <i>Absorption</i> (%)	3,63	2 – 7		
2	Kadar Air (%)	1,01	3 – 5		
3	Modulus Kehalusan	3,35	1,5 – 3,8		
	Kadar lumpur (%)			4	< 5
5	Kadar organik	No.3	≤ No.3		
6	Berat Volume (gr/cm^3)	1,31	1,4 - 1,9		
	Kondisi Gembur			1,50	1,4 - 1,9
	Kondisi Padat				

Tabel 3. menunjukkan nilai modulus kehalusan, *Bulk Specific Gravity on SSD*, *absorption*, dan kadar air secara berturut-turut menunjukkan nilai 3,35, 2,60, 3,63%, dan 1,01%. Nilai – nilai tersebut sudah memenuhi standar spesifikasi yang disyaratkan. Berat volume agregat halus pada kondisi padat adalah 1,504 gr/cm^3 dan kondisi gembur 1,313 gr/cm^3 , nilai ini sudah memenuhi standar spesifikasi. Nilai kadar lumpur yang diperoleh adalah 4%, serta untuk tes kadar zat organik agregat halus ini berada pada No.3. Nilai ini memenuhi standar untuk kadar lumpur yakni < 5 dan kadar zat organik ≤ No.3.

D.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian kuat tekan mortar geopolimer pada umur 28 hari suhu ruang.



Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Gambar 3. menunjukkan Menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan yang linier dengan penambahan persentase semen OPC dan lama waktu *curing* di suhu ruang. Nilai kuat tekan mortar geopolimer dengan variasi persentase semen OPC 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% yakni 4 MPa, 8 MPa, 8MPa, 11,2 MPa, dan 11,2 MPa pada umur 28 hari *curing* suhu ruang. Nilai kuat tekan mortar geopolimer pada umur 28 hari yang di rawat pada suhu ruang dengan menggunakan semen OPC 25% mampu meningkatkan kuat tekan sebesar 40% terhadap mortar geopolimer dengan semen OPC 10% pada umur 28. Hal ini terjadi akibat bertambahnya kandungan kalsium yang dibawa oleh semen OPC (Mehta & Siddique, 2017).

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian abu terbang dan kuat tekan mortar geopolimer

yang dilakukan perawatan pada suhu ruang maka diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Abu terbang yang berasal dari PLTU Ombilin, Sumatera Barat memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi, sehingga dapat digunakan sebagai material geopolimer
2. Persentase semen OPC yang digunakan sebagai pengganti abu terbang pada mortar geopolimer dapat meningkatkan nilai kuat tekan.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian tersebut maka peneliti memberikan beberapa saran 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 mendapatkana data yang lebih rinci.
3. Perawatan pada suhu ruang sebaiknya menggunakan wadah desikator agar suhu ruangan yang digunakan tetap stabil.

DAFTAR PUSTAKA

Adam, A. A. (2009). Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, (August), 1–127.

ASTM C 109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (2000).

ASTM C 618 – 00. (2000). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in*

- Concrete 1* (Vol. 4).
- Badan Pusat Statistik. (2016). Statistik Pertambangan Non Minyak dan Gas Bumi.
- Davidovits, J. (1994a). Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries, *6*(2), 263–278.
- Davidovits, J. (1994b). High-Alkali Cements for 21st Century Concretes. *ACI Special Publication, 144*(X), 383–398.
<https://doi.org/10.14359/4523>
- 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>
- Hardjito, D. (2005). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, (November).
- Kasyanto, H. (2012). Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Dan Sodium Silikat.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.067>
- 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. (2014). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.08.008>
- Nawi, E. G. (1998). *Beton Bertulang (Suatu Pendekatan Dasar)*. PT Refika Aditama.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology (Second Edition)* (2nd ed.).
- Olivia, M. (2011). *Durability Related Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology.
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2011). Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Designed by Taguchi Method. *Materials and Design, 36*, 191–198.
- Safitri, E. (2009). Kajian Teknis dan Ekonomis Pemanfaatan Limbah Batu Bara (Fly Ash) pada Produksi Paving Block, *IX*, 36–40.
- SNI 15-2049-2004. (2004). Semen portland. *Bandung: Badan*

Standardisasi Indonesia.

SNI 2460-2014. (2014). Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton.
Bandung: Badan Standardisasi Indonesia.

Tjokrodimuljo, K., 1996, "*Teknologi Beton*", Nafitri. Yogyakarta.