

STUDI KOEFISIEN KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER PADA BERBAGAI UMUR

Aryanto¹, Faisal², Erwin Sutandar³, Herwani⁴.

^{1,2,3,4} Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura Pontianak
Jl. Prof. Hadari Nawawi, Pontianak

Abstrak

Paper ini menyajikan hasil penelitian secara eksperimental mengenai pemanfaatan limbah pembakaran batubara pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Suralaya berupa fly ash. Material ini digunakan sebagai bahan dasar pembuatan beton Geopolimer. Pengaruh molaritas larutan alkali activator terhadap kuat tekan beton yang dihasilkan dipelajari dalam riset ini. Penggunaan larutan sodium silikat dan sodium hidroksida dipilih sebagai larutan aktivatornya. Molaritas larutan sodium hidroksida yang digunakan adalah 10 M, 12 M dan 14 M. Benda uji dibuat berupa silinder beton berdiameter 10 cm dengan tinggi 20 cm sebanyak 3 buah setiap variabel sehingga total benda uji adalah 27 buah. Perawatan benda uji dilakukan pada suhu ruang dengan ditutup plastik untuk menghindari penguapan pada benda uji. Pembahasan di fokuskan pada koefisien kuat tekan beton geopolimer umur 7 dan 14 hari terhadap umur 28 hari. Dari hasil analisa diketahui koefisien kuat tekan beton geopolimer diperoleh berturut-turut 65.5 %, 84.8%, dan 100% untuk Beton NaOH 10 M. Kemudian beton dengan konsentrasi larutan sodium hidroksida (NaOH) 12 M berturut-turut 49.8 %, 80.4%, dan 100%. Selanjutnya capaian kuat tekan beton dengan konsentrasi NaOH 14 M pada umur 7, 14, dan 28 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari berturut-turut adalah 59.6 %, 88.5%, dan 100%.

Kata kunci: Beton Geopolimer, koefisien kuat tekan, Fly ash, Alkalin Aktivator, Molaritas NaOH

Abstract

[Title: Study of Geopolymer Concrete Compressive Strength Coefficient] This paper presents the results of experimental research on the utilization of coal combustion waste (fly ash) from the Suralaya PLTU. This material is used as the basic material for making geopolymer concrete. The effect of the molarity of the alkaline activator solution on the compressive strength of the resulting concrete was studied in this research. The use of sodium silicate and sodium hydroxide solution was chosen as the activator solution. The molarity of the sodium hydroxide solution used was 10 M, 12 M and 14 M. The specimens were made in the form of a concrete cylinder with a diameter of 10 cm and a height of 20 cm with 3 pieces per variable so that the total specimens were 27 pieces. Treatment of the test object is carried out at room temperature with a plastic cover to avoid evaporation of the test object. The discussion focuses on the coefficient of compressive strength of geopolymer concrete aged 7 and 14 days against the age of 28 days. From the analysis, it is known that the coefficient of compressive strength of geopolymer concrete is 65.5%, 84.8%, and 100% for 10 M NaOH concrete, respectively. Then the concrete with a concentration of 12 M sodium hydroxide (NaOH) solution is 49.8%, 80.4%, and 100%. Furthermore, the achievement of the compressive strength of concrete with a concentration of 14 M NaOH at the age of 7, 14, and 28 days against the compressive strength of 28 days, respectively, was 59.6%, 88.5%, and 100%.

Keywords: Geopolymer Concrete; coefficient of compressive strength; Fly ash, Alkaline Activator, Molarity of NaOH

1. Pendahuluan

Beton Geopolimer adalah jenis beton yang sepenuhnya tidak menggunakan semen Portland (PC) (Herwani, et. al, 2015; Partogi, et. al, 2015). *Fly ash* hasil pembakaran batubara merupakan salah satu material yang dapat digunakan sebagai pengikat dalam campurannya (shaikh et al 2014; Siyal A A, et al 2016). Beton geopolimer ini terbentuk dari reaksi kimia dan bukan dari reaksi hidrasi seperti pada beton biasa (Davidovits, 1985). Sifat dan karakteristik yang paling mengesankan adalah bahwa beton geopolimer memiliki kuat tekan dan durabilitas yang tinggi (Hardjito and Rangan, 2005; Duxon et al, 2007; Pacheco et al. 2008, Partogi et al. 2015). Salah satu kesimpulan dari hasil penelitian menyatakan bahwa material beton geopolimer yang terkekang merupakan salah satu material yang cocok dikembangkan untuk daerah rawan gempa (Ganesan, N., 2014). Untuk memperoleh beton geopolimer yang baik, jenis aktivator disesuaikan dengan senyawa yang terkandung dalam *fly ash*. Komposisi yang tepat sangat diharapkan agar terjadi reaksi kimia secara sempurna. Aktivator yang umum digunakan adalah Sodium Hidroksida 8M sampai 14M dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dengan perbandingan antara 0.4 sampai 2.5 (Hardjito and Rangan, 2005).

Setiap daerah mempunyai batu bara dengan kandungan mineral berbeda, sehingga karakteristik *fly ash* yang dihasilkan menjadi sangat bervariasi (Partogi, et. al, 2015). Komposisi kandungan mineral *fly ash* mempengaruhi karakteristik sifat mekanik produk beton geopolimer. Kuat tekan adalah salah satu karakteristik beton yang sangat penting.

Beberapa peneliti telah melakukan disain campuran dengan berbagai variabel dan metode curing untuk membuat beton geopolimer berkualitas baik. Palomo, dkk (1999) meneliti beton geopolimer dengan menggunakan bahan *fly ash* kelas F. Ia menggunakan empat larutan yang berbeda dengan perbandingan massa antara alkali aktivator dan *fly ash* berkisar 0.25 sampai 0.30. Perbandingan molar larutan $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ atau $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ berkisar antara 0.63 sampai 1.23. Kuat tekan diperoleh setelah melakukan *curing* selama 24 jam pada suhu 65°C yaitu mencapai lebih dari 60 MPa untuk campuran yang menggunakan kombinasi aktivator *sodium hidroksida* dan *sodium silikat*. Xu, H dan van Deventer (2000) melakukan penelitian dan melaporkan bahwa perbandingan massa larutan alkali dengan alumino – silikat kira – kira 0.33 agar terjadi reaksi geopolimer. Kuat tekan maksimum yang diperoleh mencapai 19 MPa setelah di *curing* selama 72 jam pada

suhu 35°C . Van Jaarsveld dkk (2002) melakukan penelitian dengan menggunakan perbandingan massa alkali sebesar 0.39. Material yang digunakan 57% *fly ash* yang dicampur dengan 15% kaolin. Larutan alkalin terdiri dari 3.5% sodium silikat, 20% air dan 4% sodium atau potassium hydroxide. Kuat tekan maksimum yang diperoleh mencapai 75 MPa, Hardjito dan Rangan (2005) mengadakan penelitian mengenai campuran beton geopolimer. Konsentrasi sodium hidroksida (NaOH) yang digunakan berkisar antara 8M – 16M. Perbandingan massa antara sodium silikat dan sodium hidroksida berkisar antara 0.4 sampai 2.5. Sedangkan perbandingan massa antara alkali aktivator dengan *fly ash* kira – kira 35%. Mereka menyimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi molaritas sodium hidroksida menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan beton geopolimer. Dan semakin tinggi perbandingan massa antara sodium silikat dengan sodium hidroksida menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan yang dihasilkan oleh beton geopolimer tersebut. Kuat tekan beton geopolimer pada umur tujuh hari mencapai 67 MPa setelah di *curing* selama 24 jam pada suhu 60°C . Januarti Jaya Ekaputri, et.al. (2007), melakukan penelitian sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* yang berasal dari Jawa Power Paiton. Variabel yang digunakan adalah molaritas larutan aktivator dan rasio sodium silikat (Na_2SiO_3) terhadap sodium hidroksida (NaOH). Dari hasil pengujian yang dilakukan, kuat tekan yang paling baik dihasilkan oleh beton dengan komposisi molaritas larutan aktivator 10 M dengan rasio sodium silikat terhadap sodium hidroksida 1.5. Kuat tekan beton yang dihasilkan mencapai 48.59 Mpa. Tabassum R.K. (2015) melakukan penelitian terhadap pengaruh konsentrasi larutan sodium hidroksida pada campuran beton geopolimer. Kuat tekan maksimum pada umur 28 hari diperoleh adalah 40.21 MPa. Bertambahnya konsentrasi sodium hidroksida maka kuat tekan beton juga bertambah. Rasidah M.H. (2016), menyatakan konsentrasi larutan NaOH 12 M merupakan jumlah yang optimum untuk menghasilkan kuat tekan beton geopolimer yang baik

2. Experimental Method

Materials

Material penyusun beton geopolier yang digunakan diambil dari kuari setempat. Agregat halus menggunakan pasir Cimalaka sedangkan agregat kasar menggunakan batu yang diambil dari Cimahi. Ukuran agregat kasar yaitu lolos saringan 20 mm dan 10 mm. Sedangkan pasir dengan ukuran butir lolos saringan 4.75 mm. Sebagai material dasar yang berfungsi sebagai pengikat, digunakan *Fly ash* dari limbah PLTU Suryalaya. Untuk mengaktivasi unsur silica dan alumina serta unsur lain yang terkandung dalam *fly ash*,

*) Penulis Korespondensi.

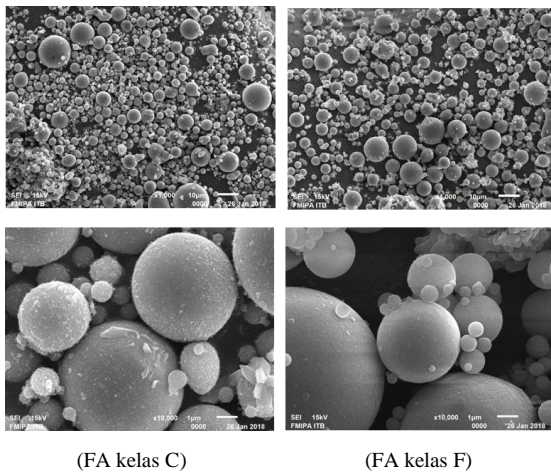
E-mail: herwani@civil.untan.ac.id

digunakan larutan alkalin. Natrium hidroksida dan Natrium Sulfat merupakan alkali yang dipilih sebagai activator dalam campuran beton geopolimer. Natrium hidroksida diperoleh dari toko bahan kimia berbentuk serpihan berwarna putih. Demikian juga dengan Natrium Sulfat, cairan ini dapat diperoleh dari toko bahan kimia dalam kemasan botol jerigen, atau drum. Sebelum dicampur dalam beton, Natrium Hidroksida terlebih dahulu dilarutkan sesuai konsentrasi yang diinginkan. Pengujian XRF (*X-ray fluorescence spectroscopy*) dilakukan untuk mengetahui kandungan mineral fly ash. Adapun kandungan unsur yang ada di fly ash adalah sebagai berikut:

Tabel 1 Komposisi kandungan kimia fly ash Suryalaya (dalam % terhadap berat)

Fly Ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	LoI
SF1	42.29	17.41	12.10	10.47	7.39	1.38	6.15
SF2	52.51	23.77	8.98	7.32	3.50	0.735	0.31

Bila dibandingkan bentuk butiran pada *fly ash* kelas CF relatif tidak beraturan dibanding kelas F. Tekstur bagian permukaan butiran kasar dan tidak rata. Sedangkan fly ash kelas F lebih halus. Hal ini dapat terlihat dari hasil foto SEM (gambar 4.1). Ukuran butir fly ash kelas CF relatif lebih kecil dan seragam dibanding fly ash kelas F.



Gambar 1. Tekstur permukaan butiran *fly ash* hasil foto SEM

Disain Campuran dan pembuatan benda uji

Disain campuran dibuat menggunakan nomogram yang diusulkan oleh Partogi et al. Nomogram yang diusulkan Partogi sesungguhnya untuk aplikasi geopolimer fasa pasta, dengan melakukan modifikasi maka nomogram ini dapat di gunakan untuk disain campuran beton geopolimer. Dalam nomogram menyatakan hubungan antara rasio molar reaktan dengan rasio berat agregat terhadap pasta. Rasio molar reaktan diperoleh dari perbandingan molaritas air terhadap molaritas material

solid ($H_2O/Na_2O+SiO_2+Al_2O_3$). Komposisi disain campuran yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2 berikut ini. Untuk memperoleh kualitas dan workabilitas yang baik, campuran beton geopolimer juga ditambahkan superplastisizer. Jumlah dan jenis superplastisizer yang digunakan sesuai kebutuhan dan dosis yang disarankan pada peraturan beton Indonesia. Merujuk pada hasil penelitian sebelumnya (Herwani, 2018) maka jumlah Superplasticizer digunakan 2%.

Tabel 2 Komposisi disain campuran beton geopolimer (dalam Kg/m³)

Jenis Material	Berat (Kg)
Agregat Kasar (SSD)	1142.7
Dia. 4.5 – 9.5 mm	457.1
Dia. 9.5 – 19.5 mm	685.6
Agregat Halus (SSD)	521.8
Fly Ash	410
Larutan NaOH	110
Larutan Na ₂ SiO ₃	120
Superpasticizer	8.2
Air Tambahan	2.3

Setiap campuran dibuat dengan variabel konsentrasi larutan NaOH adalah 10, 12, dan 14 M. Benda uji berupa silinder diameter 10 cm dengan tinggi 20 cm. Jumlah sampel sebanyak 3 buah untuk setiap variable. Pengujian dilakukan ketika beton geopolimer berumur 7, 14, dan 28 hari. Total benda uji untuk masing-masing disain campuran sebanyak 27 buah. Perawatan benda uji hanya disimpan di ruang.

3. Hasil dan Pembahasan

Kuat tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer ditunjukkan tabel 3 sampai tabel 5.

Tabel 3. Perkembangan Kuat tekan Beton Geopolimer dengan larutan NaOH 10 M

No	Umur	Berat (gr)	Luas (A)	Gaya (P)	Kuat Tekan (F)
	(hr)	(gr)	(mm ²)	(Kg)	(Mpa)
0	0	0	0	0	0
1	7	3351	7850	9500	11.86
2	14	3329	7850	12300	15.36
3	28	3290	7850	14500	18.10

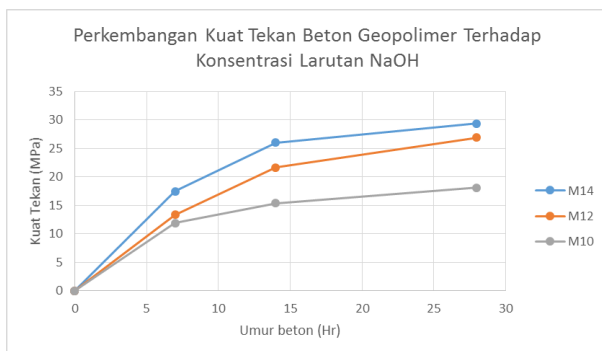
Tabel 4. Perkembangan Kuat tekan Beton Geopolimer dengan larutan NaOH 12 M

No	Umur	Berat (gr)	Luas (A)	Gaya (P)	Kuat Tekan (F)
	(hr)	(gr)	(mm ²)	(Kg)	(Mpa)
0	0	0	0	0	0.00
1	7	3376	7850	10700	13.36
2	14	3461	7850	17300	21.60
3	28	3327	7850	21500	26.84

Tabel 5. Perkembangan Kuat tekan Beton Geopolimer dengan larutan NaOH 14 M

No	Umur	Berat (gr)	Luas (A)	Gaya (P)	Kuat Tekan (F)
	(hr)	(gr)	(mm ²)	(Kg)	(Mpa)
0	0	0	0	0	0.00
1	7	3636	7850	14000	17.48
2	14	3679	7850	20800	25.97
3	28	3729	7850	23500	29.34

Nilai pada tabel diatas adalah rata-rata dari tiga buah benda uji untuk masing masing variabel pada umur pengujian. Mengingat belum adanya metode desain campuran yang baku untuk beton geopolimer dan material dasarnya berupa limbah maka kuat tekan yang direncanakan terkadang kurang sesuai dengan hasil desain campuran. Kuat tekan yang dicapai berturut-turut adalah 17.48, 25.97, dan 29.34 Mpa. Perilaku ini masih bisa ditolerir karena masih dibawah 10%. Untuk melihat kecenderungan peningkatan kuat tekan maka data pada tabel diatas disajikan kembali dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan gambar 2. *Trend* yang sama juga diperoleh pada penelitian sebelumnya (Herwani, 2017)



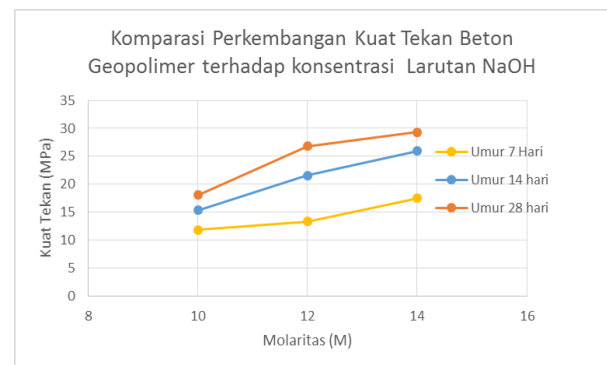
Gambar 2. Perkembangan kuat tekan beton Geopolimer terhadap konsentrasi larutan NaOH

Dari gambar 2 terlihat gradien garis ketiga specimen sampai umur 7 hari relatif kecil. Namun gradien garis pada umur 14 hari ke 28 hari relatif lebih besar sehingga memungkinkan peningkatan kekuatan setelah 28 hari masih cukup signifikan. Kondisi ini menunjukkan reaksi polimerisasi pada beton geopolimer relatif lebih lambat. Perilaku ini dipengaruhi oleh komposisi kimia *fly ash* cukup dominan. Kandungan CaO yang tinggi pada *fly ash* dapat mengurangi laju reaksi polimerisasi beton.

Semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH maka kuat tekan beton geopolimer yang dihasilkan juga meningkat (gambar 2). Sebenarnya peningkatan kuat tekan beton geopolimer bukan semata karena konsentrasi larutan NaOH saja tetapi lebih di karenakan komposisi kimia unsur material penyusunnya seperti

SiO₂ dan Al₂O₃. Rasio larutan Na₂SO₃ terhadap NaOH juga menentukan kuat tekan beton yang dihasilkan. Dalam penelitian ini kuat tekan maksimum dicapai hingga 29.34 MPa yaitu pada beton dengan konsentrasi larutan NaOH 14 M. Sedangkan kuat tekan terendah diperoleh pada beton dengan konsentrasi NaOH 10 M yaitu sebesar 18.10 Mpa. Namun semakin tinggi konsentrasi larutan belum tentu diperoleh peningkatan kekuatan tekan beton secara linier. Hal ini terkonfirmasi dari grafik hubungan kuat tekan beton geopolimer terhadap konsentrasi larutan NaOH (gambar 3).

Dari kurva yang terbentuk terlihat hubungan peningkatan kuat tekan terhadap molaritas NaOH adalah tidak linier tetapi lebih cenderung berupa hubungan secara parabolik (gambar 3).



Gambar 3. Hubungan konsentrasi larutan NaOH terhadap kuat tekan pada berbagai umur beton Geopolimer

Koefisien kuat tekan beton geopolimer

Koefisien kuat tekan beton geopolimer adalah dihitung dari kuat tekan umur tertentu dibagi kuat tekan umur 28 hari seratus. Angka ini menyatakan persentase pencapaian kuat tekan beton pada umur tertentu terhadap kuat tekan rencana. Kuat tekan rencana adalah kuat tekan pada umur 28 hari.

Persentase kuat tekan beton dengan konsentrasi NaOH 10 M pada umur 7, 14, dan 28 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari berturut-turut adalah 65.5 %, 84.8%, dan 100%. Kemudian capaian kuat tekan beton dengan konsentrasi NaOH 12 M pada umur 7, 14, dan 28 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari berturut-turut adalah 49.8 %, 80.4%, dan 100%. Selanjutnya capaian kuat tekan beton dengan konsentrasi NaOH 14 M pada umur 7, 14, dan 28 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari berturut-turut adalah 59.6 %, 88.5%, dan 100%. Sementara kuat tekan beton berbasis semen OPC terhadap kekuatan umur 28 hari berturut 65%, 88%, dan 100%. Bila dibandingkan dengan beton semen OPC, capaian kuat tekan beton geopolimer relative lebih kecil. Besar capaian kuat tekan beton terhadap umur 28 hari masing-masing variabel konsentrasi NaOH dapat dilihat pada tabel 6 sampai tabel 8.

Tabel 6. Persentase kuat tekan beton Geopolimer larutan NaOH 10 M

No	Umur	Kuat Tekan (F)	% 28 hr
	(hr)	(Mpa)	(%)
0	0	0	0
1	7	11.86	65.52
2	14	15.36	84.83
3	28	18.10	100.00

Tabel 7. Persentase kuat tekan beton Geopolimer larutan NaOH 12 M

No	Umur	Kuat Tekan (F)	% 28 hr
	(hr)	(Mpa)	(%)
0	0	0.00	0
1	7	13.36	49.77
2	14	21.60	80.47
3	28	26.84	100.00

Tabel 8. Persentase kuat tekan beton Geopolimer larutan NaOH 14 M

No	Umur	Kuat Tekan (F)	% 28 hr
	(hr)	(Mpa)	(%)
0	0	0.00	0
1	7	17.48	59.57
2	14	25.97	88.51
3	28	29.34	100.00

Kesimpulan

Jenis Fly Ash (SF1) yang digunakan termasuk pada kelas C (high calcium) dengan komposisi kandungan CaO diatas 10% berat FA sedangkan SF2 termasuk kelas F dengan kandungan CaO 7.32% berat FA. Tekstur permukaan partikel FA kelas C lebih kasar dan tidak rata bila dibanding FA kelas C. Reaksi polimerisasi lebih lambat dibanding reaksi hidrasi terlihat dari persentase kuat tekan yang dicapai pada umur 7 dan 14 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari beton geopolimer lebih kecil dibanding beton semen OPC. Peningkatan konsentrasi larutan NaOH pada larutan alkali aktivator dapat meningkatkan kuat tekan beton yang dihasilkan. Tetapi hubungan konsentrasi larutan tidak linier terhadap kekuatan tekan beton. Dengan perawatan beton pada suhu ruang diperoleh kuat tekan beton tertinggi rata-rata sebesar 29.34 MPa pada komposisi campuran setara untuk mutu M30 konsentrasi larutan NaOH 14 M. Persentase pencapaian kuat tekan beton geopolimer terhadap kekuatan tekan umur 28 hari lebih kecil dibanding Benton semen OPC.

Ucapan terima kasih

Terima kasih atas bantuan dana kepada Kementerian Riset dan Teknologi melalui dana DIPA UNTAN TA 2021.

References

Aleem, MA & Arumairaj, P 2012, 'GEOPOLYMER CONCRETE-A Review', *International Journal*

of Engineering Sciences & Emerging Technologies, vol. 1, no. 2, pp. 118-22.

Bhikshma, V, Koti, RM & Srinivas, R 2012, 'An experimental investigation on properties of geopolymer concrete (no cement concrete)', *ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING)*, vol. 13, no. 6, pp. 841-53.

Davidovits, J 1999, 'Chemistry of geopolymeric systems, terminology', in *Proceedings of Second International Conference on Geopolymer: proceedings of the Proceedings of Second International Conference on Geopolymer* pp. 9 40.

Diaz-Loya, E, Allouche, EN & Vaidya, S 2011, 'Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete', *ACI Materials Journal*, vol. 108, no. 3, pp. 300-6.

Guerrieri, M & Sanjayan, JG 2010, 'Behavior of combined fly ash/slag based geopolymers when exposed to high temperatures', *Fire and Materials*, vol. 34, no. 4, pp. 163-75.

Guo, X, Shi, H & Dick, WA 2010, 'Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer', *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 2, pp. 142-7.

Hardjito, D & Rangan, BV 2005, 'Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete', *Research Report, Perth, Australia: Curtin University of Technology*.

Hardjito, D, Wallah, SE, Sumajouw, DM & Rangan, BV 2004, 'On the development of fly ash-based geopolymer concrete', *ACI Materials Journal-American Concrete Institute*, vol. 101, no. 6, pp. 467-472.

Hardjito, D, Wallah, SE, Sumajouw, DM & Rangan, BV 2005, 'Fly ash-based geopolymer concrete', *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 77-84.

Herwani, Imran, I., Budiono, B., Pane, I., Zulkifli, E., & Elvira, 2018, 'Efektifitas Superplasticizer terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Beton Geopolimer', *Portal Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no.2, pp. 12-18.

Herwani, I. Pane, I. Imran, .B. Budiono, 2017 " Compressive strength of fly ash-based geopolymer Concrete with a variable of sodium hydroxide (NaOH) solution molarity", *SIBE international conference*

Joshi, S & Kadu, M 2012, 'Role of Alkaline Activator in Development of Eco-friendly Fly Ash Based Geo Polymer Concrete', *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 3, no. 5, pp. 417-21.

Kong, DL & Sanjayan, JG 2008, 'Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated

- temperatures', *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 10, pp. 986-91.
- Kong, DL & Sanjayan, JG 2010, 'Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete', *Cement and concrete research*, vol. 40, no. 2, pp. 334-9.
- Kumar, S & Kumar, R 2011, 'Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer', *Ceramics International*, vol. 37, no. 2, pp. 533-41.
- Kumar, S, Kumar, R & Mehrotra, S 2010, 'Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer', *Journal of Materials Science*, vol. 45, no. 3, pp. 607-15.
- Li, Z & Liu, S 2007, 'Influence of slag as additive on compressive strength of fly ash-based geopolymer', *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 470-4.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. & Jalali, S., Alkali Activated Binders: A review, Part 1, Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 1305-1314, 2008.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. & van Deventer J.S.J., Geopolymer Technology: The Current State of the Art, *Material Science*, 42, pp. 2917-2933, 2007