

Evaluasi Pengaruh Variasi Molaritas dan Rasio Alkali Aktivator terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer

EUNEKE WIDYANINGSIH^{*1}, BERNARDINUS HERBUDIMAN¹,
FIKRI FANNY FAUZI²

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia
Email: eunekewidya@itenas.ac.id

ABSTRAK

Bertambahnya populasi penduduk berbanding lurus dengan kebutuhan infrastruktur, salah satunya meningkatnya kebutuhan beton yang berdampak buruk pada pencemaran lingkungan. Upaya untuk mengurangi pencemaran tersebut adalah pembuatan beton ramah lingkungan salah satunya adalah beton geopolimer. Bahan utama geopolimer adalah agregat dan binder yang terdiri dari fly ash dan alkali aktivator. Pada penelitian ini dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh variasi alkali aktivator dalam binder yang digunakan dalam pembuatan geopolimer terhadap kuat tekan geopolimer. Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder yang dikumpulkan dari berbagai jurnal pada penelitian lain yang telah dilakukan. Dari hasil analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa ada dua faktor yang bervariasi dalam penggunaan alkali aktivator yaitu molaritas dan rasio antara NaOH/Na₂SiO₃. Semakin besar perbandingan NaOH terhadap Na₂SiO₃ dalam komposisi geopolimer menghasilkan kuat tekan yang lebih kecil. Sementara semakin tinggi molaritas NaOH akan menghasilkan kuat tekan yang semakin tinggi pula.

Kata kunci: beton geopolimer, alkali aktivator, molaritas

ABSTRACT

The increase in population is needed for infrastructure development, the one that affected by this is the increasing need for concrete. This matter has a negative impact on environmental pollution. Some efforts to reduce this pollution are to manufacture environmentally friendly concrete, one of which is geopolimer concrete. The main ingredients of geopolimers are aggregate and binder consisting of fly ash and alkaline activator. In this study, an analysis was carried out to determine the effect of variations in the alkaline activator in the binder used in the manufacture of geopolimers on the compressive strength of geopolimers. This study uses primary data and secondary data collected from various journals in other studies that have been conducted. From the results of the analysis performed, it shows that there are two factors that vary in the use of alkaline activators, namely molarity and the ratio between NaOH/Na₂SiO₃. The greater the ratio of NaOH to Na₂SiO₃ in the geopolimer composition, the lower the compressive strength. Meanwhile, the higher the molarity of NaOH, the higher the compressive strength will be.

Keywords: geopolimer concrete, fly ash, activator, molarity

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur adalah kebutuhan yang vital untuk menyertai perkembangan populasi manusia di zaman modern ini. Selain dari segi populasi, perkembangan infrastruktur juga diharapkan dapat memberikan kenyamanan, keamanan dan keefektifan manusia dalam melakukan aktifitas sehari-hari. Dilansir dari situs resmi United Nation, diperkirakan pada tahun 2050 jumlah penduduk di dunia ini akan mencapai 9,7 miliar penduduk. Hal ini tentu berdampak pada bertambahnya kebutuhan akan konstruksi infrastruktur yang memadai namun tetap menjadikan aksi terhadap dampak lingkungan suatu kepentingan yang menjadi prioritas.

Tiga pilar dalam pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan adalah dari segi sosial atau masyarakat, perkembangan ekonomi dan kepedulian pada lingkungan. Mengacu pada ketiga pilar tersebut dan *Sustainable Development Goals* (SDG's) yang berlaku saat ini, penelitian mulai banyak yang berfokus pada menciptakan material baru yang lebih ramah terhadap lingkungan namun tetap memiliki kapasitas baik untuk konstruksi infrastruktur.

Saat ini, material konstruksi yang sering digunakan adalah kayu, beton, dan baja. Dari ketiga material tersebut beton adalah material yang paling diminati dalam konstruksi karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi, harga yang relatif murah, serta tahan terhadap api. Namun terdapat kendala dalam proses produksi beton yang memberikan dampak negative terhadap lingkungan. Pada proses pembuatan semen untuk campuran beton menghasilkan 7% CO₂ selama keseluruhan prosesnya [1]. Industri semen adalah penyumbang sekitar 8% emisi karbondioksida (CO₂) dunia, terbesar ketiga setelah industri penerbangan dan pertanian [2]. Hal ini dapat memperburuk dampak pemanasan global dan tidak mendukung upaya penggunaan material yang ramah lingkungan dalam konstruksi.

Beton ramah lingkungan mulai kenalkan oleh Davidovits melalui material geopolimer. Untuk pembuatan material ini bahan pengikat agregat yang sebelumnya terbuat dari semen diganti dengan menggunakan bahan pengikat organik, seperti alumina-silikat polimer, yang merupakan sinetesa dari material geologi yang terdapat pada material alam yang banyak mengandung silika dan alumina [3].

Bahan dasar utama pembuatan beton geopolimer adalah bahan yang banyak mengandung silika dan aluminium. Unsur-unsur ini banyak terdapat pada material buangan hasil sampingan industri, seperti abu terbang (*fly ash*) sisa pembakaran batu bara. Ikatan geopolimer harus menggunakan larutan bersifat alkalis atau dikenal dengan istilah alkali aktivator untuk melarutkan unsur-unsur silika dan aluminium, serta memungkinkan terjadinya reaksi kimiawi. Aktivator yang digunakan terdiri dari campuran Sodium hidroksida (NaOH) dan Sodium silikat (Na₂SiO₃). Dari campuran tersebut terjadi ikatan geopolimer dan menjadikan campuran tersebut sebagai binder atau pengikat untuk menghasilkan ikatan antar agregat dalam campuran beton.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (*admixture*) [3]. Seiring dengan penambahan umur, beton akan semakin mengeras dan akan mencapai kekuatan rencana (f'_c) pada usia 28 hari. Beton memiliki daya kuat tekan yang baik, sehingga beton banyak dipakai atau dipergunakan untuk pemilihan jenis struktur terutama struktur bangunan, jembatan, dan jalan.

Beton bersifat getas sehingga mempunyai kuat tekan tinggi namun kuat tarik rendah. Kuat tekan beton biasanya berhubungan dengan sifat-sifat lain, yaitu bila kuat tekannya tinggi maka umumnya sifat-sifat yang lain juga baik.

2.2 Beton Geopolimer

Istilah geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits tahun 1978 untuk menggambarkan kelompok mineral pengikat dengan komposisi kimia yang mirip dengan zeolit, tapi dengan mikrostruktur yang tak berbentuk. Zeolit pada dasarnya merupakan padatan alumina-silika yang memiliki struktur yang berpori. Zeolit alam biasanya terbentuk dari batu dan abu gunung berapi yang beraksi dengan logam alkali tanah pada air tanah. Zeolit murni hampir tidak dapat ditemukan di alam. Biasanya terdapat pengotor seperti logam natrium dan kalsium. Abu terbang batubara memiliki potensi dikonversi menjadi zeolit jika memiliki kandungan alumina-silika yang cukup tinggi dan kandungan karbon yang rendah. Davidovits juga mengusulkan penggunaan istilah 'poly(sialate)' untuk nama unsur kimia geopolimer yang berasal dari silika-alumina.

Tabel 1 menunjukkan kelebihan dan kekurangan beton geopolimer.

Tabel 1. Kelebihan dan Kekurangan Geopolimer [5]

Kelebihan	Kekurangan
<ul style="list-style-type: none"> • Tahan terhadap serangan sulfat. • Mempunyai rangkai (mengembang) dan susut yang kecil. • Tahan reaksi alkali – silika. • Dapat mengurangi polusi udara. • Pada kondisi tertentu beton geopolimer lebih unggul dibandingkan beton Portland konvensional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pembuatannya lebih rumit dari pada beton konvensional (karena membutuhkan alkali aktivator yang reaktif terhadap logam) • Belum ada <i>mix design</i> yang pasti. • Biaya pembuatan lebih mahal dari pada material konstruksi lain

2.3 Fly Ash

Fly ash adalah material yang bersifat pozzolanik dan berasal dari sisa pembakaran batu bara. Jika *fly ash* dicampur dengan air, maka terjadi reaksi kimia antara kandungan oksida silika dalam *fly ash* dengan kalsium hidroksida akibat proses hidrasi semen sehingga memiliki kemampuan mengikat. Adapun komposisinya sebagian besar terdiri dari Silikat Dioksida [SiO_2], Aluminium Oksida [Al_2O_3], Besi oksida [Fe_2O_3], dan Kalsium Oksida [CaO]. Selain itu, *fly ash* juga mengandung sedikit Magnesium, Potasium, Sodium, Titanium, dan Sulfur. Komposisi kimia dari *fly ash* sebagian besar dipengaruhi oleh tipe batu bara.

Fly ash memiliki karakteristik yang hampir mirip dengan semen. Sifat fisika dari *fly ash* yaitu *specific gravity* 2,2 – 2,8 dan ukuran butir 1 μm – 1mm (lolos ayakan 200 mesh = 40 – 75 μm) [6]. Adapun komposisi CaO menjadi unsur pembeda antara *fly ash* dengan semen. Jumlah unsur CaO pada semen konvensional berkisar sekitar 50% atau lebih, sedangkan pada *fly ash* hanya sekitar 1-2%. Jumlah unsur CaO sangat mempengaruhi daya rekat semen sehingga cepat mengeras jika dicampur dengan air (pengaruh angka hidrolitas). Oleh karena itu, bahan tambahan berupa kapur ($CaCO_3$) dapat digunakan untuk *fly ash* sehingga karakteristiknya menyerupai semen.

Fly ash diklasifikasikan menjadi beberapa kelas *fly ash* menurut jenisnya. Klasifikasi jenis *fly ash* adalah sebagai berikut:

1. Kelas C

Fly ash yang mengandung CaO di atas 10% dan dihasilkan dari pembakaran lignit atau batu bara dengan kadar karbon $\pm 60\%$.

2. Kelas F

Fly ash yang mengandung CaO lebih kecil dari 10%, dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis *anthracite* pada suhu 1.560°C, dan bersifat pozzolan.

3. Kelas N

Pozzolan alam dapat digolongkan menjadi tanah diatomik, *opaline chert*, *shales*, *tuff*, dan abu vulkanik. Selain itu, dihasilkan dari pembakaran yang memiliki sifat pozzolan baik.

Di Indonesia, saat ini tingkat pemanfaatan *fly ash* dalam produksi semen masih tergolong amat rendah dibandingkan dengan Tiongkok sekitar 15% atau India kurang dari 5% untuk memanfaatkan *fly ash* dalam pembuatan beton. Pemanfaatan *fly ash* akan mendatangkan efek ganda pada tindak penyelamatan lingkungan, yaitu penggunaan abu terbang akan memangkas dampak negatif jika dibuang begitu saja dan sekaligus mengurangi penggunaan semen Portland dalam pembuatan beton.

2.4 Alkali Aktivator

Aktivator merupakan zat atau unsur yang menyebabkan zat atau unsur lain bereaksi. Dalam pembuatan beton geopolimer diperlukan alkali aktivator yang berfungsi mereaksikan kandungan kimia pada *fly ash*, sehingga pasta geopolimer dapat mengikat agregat. Aktivator yang umum digunakan adalah Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3) yang berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian diawali dengan menyusun rumusan masalah dari latar belakang. Perumusan masalah adalah poin dimana pertanyaan dalam penelitian ini timbul dan perlu dikaji untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan latar belakang dan tujuan penelitian.

Setelah merumuskan masalah dilakukan kajian data primer dan sekunder dengan batasan data sekunder yang digunakan usia publikasinya tidak lebih dari 10 tahun. Sumber data sekunder yang diperoleh merupakan literatur yang masih memiliki kaitan dengan penelitian ini. Setelah literatur yang didapat dikelompokkan dilakukan analisis literatur. Analisis literatur berfungsi untuk menemukan jawaban pertanyaan penelitian. Hasil analisis dipaparkan untuk membahas penelitian. Dari pemaparan hasil analisis tersebut ditarik sebuah kesimpulan yang akan menjadi inti dari penelitian yang dilakukan.

4. ANALISIS DATA

4.1 Pengolahan Data

Hasil dari pencarian literatur yang sesuai dengan skripsi ini didapat berbagai literatur yang memiliki bahasan yang sesuai. Data sekunder lalu dikelompokkan menurut hasil uji kuat tekan beton dengan komposisi geopolimer yang beragam dan alkali aktivator berupa NaOH: Na_2SiO_3 .

4.2 Hipotesis

Dari literatur geopolimer yang dibahas pada tinjauan pustaka, maka terdapat beberapa hipotesis yang perlu dibuktikan, baik melalui data sekunder maupun data primer di laboratorium, yaitu:

1. Molaritas alkali aktivator menunjukkan tingkat kereaktifan larutan dalam membentuk ikatan kimia dalam geopolimer. Semakin tinggi molaritas akan menghasilkan reaksi kimia yang lebih baik sehingga kuat tekan beton geopolimer akan meningkat.

- Rasio NaOH/Na₂SiO₃ akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada ikatan antar material pengisi geopolimer. Pengaruh ini akan cukup variatif tergantung pada tipe *fly ash* yang digunakan pada pembuatan geopolimer.

4.3 Analisis

Analisis yang dilakukan dalam penulisan terdiri dari beberapa analisis. Tahap pertama adalah pengelompokan data dalam bentuk matriks guna mempermudah analisis selanjutnya. Tahap selanjutnya dilakukan analisis terhadap perbandingan rasio dan molaritas alkali aktivator terhadap kuat tekan beton. Analisis terakhir yang dilakukan adalah mencari komposisi campuran untuk kuat tekan beton rencana 21 MPa dengan menggunakan material sesuai rekomendasi dari analisis matriks sebelumnya.

Tabel 2 adalah tabel matriks data literatur mortar maupun beton geopolimer yang digunakan dalam analisis.

Tabel 2. Matriks Data Variasi Geopolimer

No	Sumber	Tipe Benda Uji	Jenis Binder	Molaritas	Rasio NaOH/Na ₂ SiO ₃	Usia Benda Uji (hari)	f _c tercapai (MPa)	f _c tercapai 28 hari (MPa)	
1	Data Primer	Mortar Geopolimer	Fly Ash PLTU Tanjung Jati B	9	M	0,40	28,13	18,75	
2				9	M	1,20	20,98	13,99	
3				9	M	2,50	9,83	6,55	
4				11	M	0,40	16,47	10,98	
5				11	M	1,20	15,29	10,19	
6				11	M	2,50	22,49	14,99	
7				13	M	0,40	28,23	18,82	
8				13	M	1,20	9,83	6,55	
9				13	M	2,50	12,85	8,57	
10	Prasetio, P (2013) [7]	Mortar Geopolimer	Lumpur Sidoarjo	8	M	0,467	26,8	44,65	
11				10	M	0,467	7	24,4	40,65
12				12	M	0,467	21,6	35,98	
13	Kurniawan, B (2021) [8]	Mortar Geopolimer	Fly Ash kelas C	12	M	-	28	41,61	41,61
14				14	M	-	56,15	56,15	
15	Apsari, D (2017) [9]	Mortar Geopolimer	Fly Ash Kelas C dari CV Dwi Mitra Surya Menganti Gresik	6	M	-	28	13,17	13,17
16				8	M	-	15,36	15,36	
17				10	M	-	20,14	20,14	
18				12	M	-	23,21	23,21	
19				14	M	-	16	16,00	
20	15	M	-	15,18	15,18				

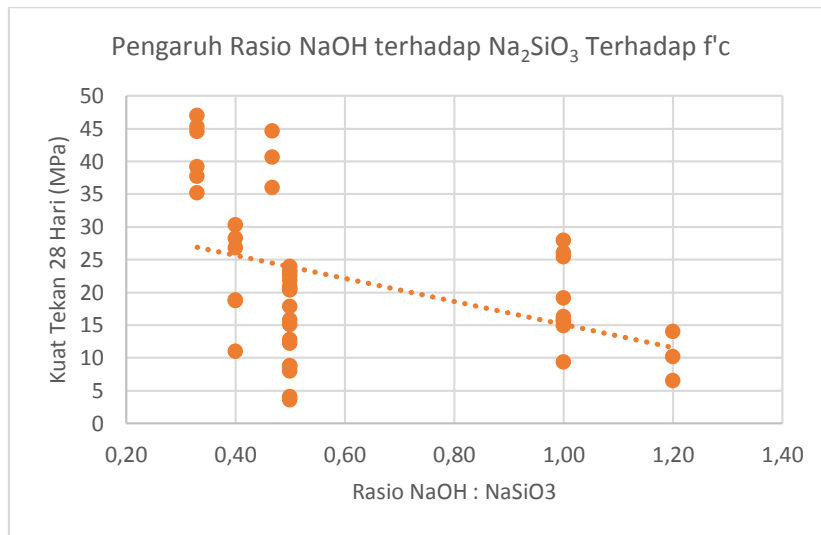
Tabel 2. Matriks Data Variasi Geopolimer lanjutan

N o	Sumber	Tipe Benda Uji	Jenis Binder	Molaritas	Rasio NaOH/Na ₂ SiO ₃	Usia Benda Uji (hari)	f'c tercapai (MPa)	f'c tercapai di 28 hari (MPa)				
21	Syafputra, B (2020) [10]	Beton Geopolimer	Fly Ash PLTU Pelabuhan Ratu	10	M	0,5	7	7,33	12,21			
22				10	M	0,5	14	12,09	15,81			
23				10	M	0,5	28	17,82	17,82			
24				10	M	0,5	56	30,67	20,34			
25				12	M	0,5	7	9,06	15,09			
26				12	M	0,5	14	17,61	23,03			
27				12	M	0,5	28	22,55	22,55			
28				12	M	0,5	56	31,42	20,83			
29				14	M	0,5	7	12,27	20,44			
30				14	M	0,5	14	18,3	23,94			
31				14	M	0,5	28	23,32	23,32			
32				14	M	0,5	56	32,88	21,80			
33				Kasyanto, H (2012) [11]	Beton Geopolimer	Fly Ash PLTU Suralaya	8	M	1	7	9,373	15,61
34							8	M	0,5	7	2,171	3,62
35	8	M	0,33				7	28,2	46,98			
36	8	M	1				14	7,151	9,35			
37	8	M	0,5				14	3,146	4,12			
38	8	M	0,33				14	34,592	45,25			
39	8	M	1				28	19,175	19,18			
40	8	M	0,5				28	12,824	12,82			
41	8	M	0,33				28	39,147	39,15			
42	10	M	1				7	9,415	15,68			
43	10	M	0,5				7	4,814	8,02			
44	10	M	0,33				7	22,626	37,69			
45	10	M	1				14	12,456	16,29			
46	10	M	0,5				14	6,769	8,85			
47	10	M	0,33				14	34,066	44,56			
48	10	M	1				28	14,948	14,95			
49	10	M	0,5				28	8,701	8,70			
50	10	M	0,33	28	35,23	35,23						
51	Satria, J (2016) [12]	Beton Geopolimer	n/a	8	M	0,5	7	61,2	101,95			
52				8	M	0,4	7	56,2	93,62			
53				8	M	0,33	7	56	93,29			
54				8	M	0,5	14	62,7	82,01			
55				8	M	0,4	14	65,8	86,07			
56				8	M	0,33	14	57,6	75,34			
57				8	M	0,5	28	67,2	67,20			
58				8	M	0,4	28	68,2	68,20			
59				8	M	0,33	28	60,5	60,50			

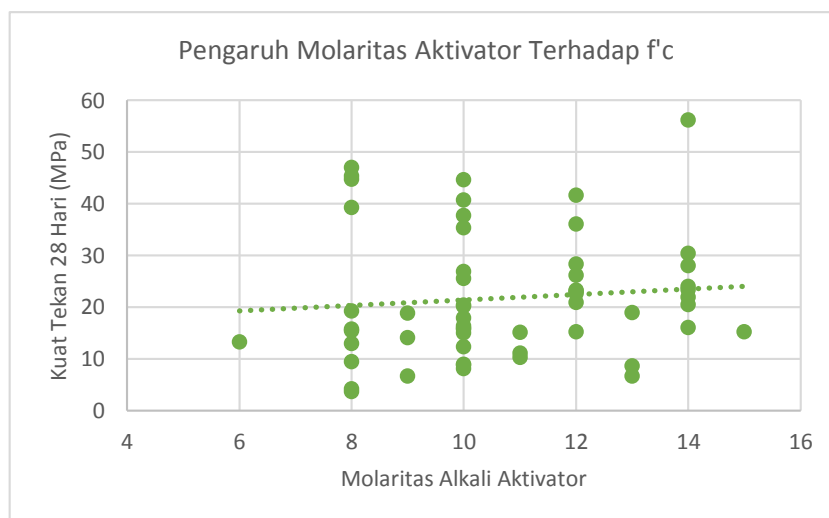
Tabel 2. Matriks Data Variasi Geopolimer lanjutan

No	Sumber	Tipe Benda Uji	Jenis Binder	Molaritas	Rasio NaOH/Na ₂ SiO ₃	Usia Benda Uji (hari)	f'c tercapai (MPa)	f'c tercapai 28 hari (MPa)
60	Setiawati, M (2022) [13]	Beton Geopolimer	Fly Ash dari PT Pupuk Sriwidjaja	10	M	0,4	28	26,80
61				10	M	1	28	25,43
62				12	M	0,4	28	28,30
63				12	M	1	28	26,08
64				14	M	0,4	28	30,32
65				14	M	1	28	27,95

Gambar 1 dan **Gambar 2** menunjukkan hubungan antara kuat tekan geopolimer yang tercapai baik terhadap molaritas alkali aktivator maupun terhadap rasio perbandingan aktivator.



Gambar 1. Perbandingan rasio aktivator dengan kuat tekan



Gambar 2. Perbandingan molaritas aktivator dengan kuat tekan

4.4 Pembahasan

Parameter-parameter pada komponen alkali aktivator yang mempengaruhi kuat tekan antara lain adalah:

1. Rasio NaOH terhadap Na_2SiO_3

Pengaruh Rasio NaOH terhadap Na_2SiO_3 terhadap kuat tekan adalah sebagai berikut:

- Semakin besar nilai rasio NaOH terhadap Na_2SiO_3 dalam komposisi geopolimer menghasilkan kuat tekan yang lebih kecil, hal ini dapat dilihat dari kecenderungan trendline grafik yang menurun dengan bertambahnya rasio NaOH terhadap Na_2SiO_3 .
- Rentang rasio yang banyak digunakan dalam penelitian terkait komposisi geopolimer adalah 0,33 sampai dengan 1,20.
- Rasio dominan yang digunakan dalam penelitian terkait geopolimer adalah rasio dengan nilai lebih kecil dari 0,5.

2. Molaritas

- Semakin tinggi molaritas yang digunakan, maka kuat tekan geopolimer memiliki kecenderungan untuk meningkat
- Trendline untuk hubungan antara molaritas alkali aktivator dan kuat tekan geopolimer menunjukkan peningkatan kuat tekan yang berbanding lurus dengan molaritas alkali aktivator
- Rentang molaritas alkali aktivator yang banyak digunakan dalam penelitian terkait geopolimer adalah mulai dari 6M sampai dengan 15M.
- Semakin tinggi molaritas NaOH semakin tinggi pula kuat tekannya, tetapi akan berpengaruh terhadap *workabilitas* beton tersebut [14]. Sehingga walaupun molaritas yang semakin meningkat dapat menghasilkan kuat tekan yang lebih baik dari segi keaktifan reaksi, namun karena pengerjaan yang sulit dapat mengakibatkan penurunan nilai kuat tekan karena metode pelaksanaan yang kurang optimum.

3. Parameter yang diambil pada analisis ini mengabaikan jenis agregat, jenis *fly ash* dan metode pelaksanaan. Ketiga faktor tersebut juga dapat mempengaruhi nilai kuat tekan dari geopolimer yang diuji.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil dari pengumpulan data dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai rasio perbandingan NaOH terhadap Na_2SiO_3 berbanding terbalik dengan kuat tekan geopolimer. Semakin besar perbandingan NaOH terhadap Na_2SiO_3 dalam komposisi geopolimer menghasilkan kuat tekan yang lebih kecil.
2. Dari poin nomor (1) dapat pula dinyatakan bahwa semakin banyak komponen Natrium Silikat (Na_2SiO_3) dalam komposisi geopolimer akan menghasilkan kuat tekan yang lebih baik. Namun perlu dilihat kembali pengaruh komponen tersebut dalam kemudahan pelaksanaan (*workabilitas*) geopolimer.
3. Nilai molaritas NaOH mempengaruhi kuat tekan geopolimer. Semakin tinggi molaritas akan menghasilkan kuat tekan yang semakin tinggi pula.
4. Namun, nilai kuat tekan terhadap perbandingan molaritas ini nampaknya masih dipengaruhi oleh nilai *workabilitas* geopolimer yang semakin menurun dengan bertambahnya nilai molaritas. Sehingga peningkatan nilai kuat tekan dari trendline data tidak signifikan.
5. Analisis data ini diambil dengan penyeteraan usia geopolimer ke 28 hari dan metode curing yang sama yaitu metode curing tanpa pembasahan.

5.2 Saran

Hasil dari pengumpulan data dan analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Matriks data, trendline data dan kesimpulan dari analisis ini perlu dibuktikan dengan mengumpulkan data primer di laboratorium dengan temperature pelaksanaan, jenis fly ash, jenis agregat dan metode pelaksanaan yang sama sehingga dapat membuktikan teori yang disimpulkan melalui data yang bersifat kualitatif.
2. Pengumpulan data yang diperlukan perlu ditambahkan dengan uji slump dan uji waktu ikat dari masing-masing variasi binder (alkali aktivator dan fly ash) dengan rasio perbandingan dan molaritas NaOH yang berbeda-beda untuk mempertimbangkan pengaruh dari workabilitas geopolimer terhadap kuat tekan.
3. Perlu dilihat pengaruh dari bahan tambah yang dapat meningkatkan workabilitas beton seperti Superplatisizer terhadap workabilitas dari geopolimer. Apabila superplatisizer dapat berpengaruh dengan signifikan, maka hal ini dapat menjadi solusi untuk mempermudah pelaksanaan dan memaksimalkan nilai kuat tekan apabila dilakukan pembuatan komposisi geopolimer dengan molaritas NaOH yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Authority. (2021). *Driving Energy Efficiency in Heavy Industries*. Dipetik November 10, 2022, dari <https://www.iea.org>
- [2] Chatham House. (2018). *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Dipetik November 10, 2022, dari <https://www.chathamhouse.org>
- [3] Davidovits, J. (1999) *Chemistry of Geopolymeric Systems Terminology*. Proceedings of Geopolymer. International Conference, France, 1999
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (2013) *SNI 2847-2013 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [5] Skvara, F. (2008). *Geopolymer Concrete – An Ancient Material Too?.* Prague: Institute of Chemical Technology Prague.
- [6] American Concrete Institute. (1993). *ACI Manual of Concrete Practice Index*. United States of America.
- [7] Prasetio, P.P., Kartadinata, G., Hardjito, D. & Antoni. (2013). Karakteristik Mortar dan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Lumpur Sidoarjo. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 2(1), 1-7.
- [8] Kurniawan, B. & Mokhtar, A. (2021). Pengaruh Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolymer. *Proceeding Seminar Keinsinyuran 2021, Volume 1*, pp. 14-22. Malang: Program Studi Program Profesi Insinyur Universitas Muhammadiyah Malang.
- [9] Apsari, D.N.P. (2017). Pengaruh Penambahan Variasi Molaritas Naoh terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lekat Mortar Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang pada Aplikasi Spesi Bata Merah. *REKATS (Rekayasa Teknik Sipil)*, 2(2), 244-249.
- [10] Syafputra, B. & Kurniawati, E.K. (2020). Pengaruh Variasi Molaritas pada Kuat Tekan Beton Geopolymer Fly Ash dengan Agregat Halus Pasir Kuarsa. *SANTIKA Jurnal Ilmiah Sains dan Teknologi*, 10(1), 1-9.
- [11] Kasyanto, H. (2012). Tinjauan Kuat Tekan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktivator Sodium Hidroksida Dan Sodium Silikat. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar, Volume 3*, pp. 254-259. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
- [12] Satria, J (2016). Karakteristik Beton Geopolimer Berdasarkan Variasi Waktu Pengambilan Fly Ash. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 5(1), 1-8.
- [13] Setiawati, M. (2022). Variasi Molaritas Naoh Dan Alkali Aktivator Beton Geopolimer. *Jurnal Deformasi*, 7(1), 56-64.
- [14] Ekaputri, J. (2013). Sodium Sebagai Aktivator Fly Ash, Trass Dan Lumpur Sidoarjo Dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 1-10.