

Komparasi Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Metode Curing Oven dan Suhu Ruang

Juandra Hartono¹⁾, Laely Fitria H²⁾, Adityo Budi U³⁾, Hinawan Teguh S⁴⁾

^{1,2,3,4)} Politeknik Pekerjaan Umum, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat

Email: juandra.hartono@pu.go.id¹⁾, laely.fh@pu.go.id²⁾, adityobudiutomo@pu.go.id³⁾, hteguhsantoso@gmail.com⁴⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v12i2.714>

(Received: February 2022 / Revised: July 2022 / Accepted: August 2022)

Abstrak

Penelitian ini mengkaji tentang beton geopolimer berbahan dasar fly ash. Alkali aktivator berbentuk sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3) dengan molaritas (10M). Riset ini bertujuan mengetahui perbandingan kuat tekan maksimum binder dan beton geopolimer diumur 28 hari melalui 2 metode perawatan, udara terbuka dan dioven pada temperatur 60°C selama 24 jam. Rangkaian pengujian berupa uji material fly ash, slump dan uji kuat tekan. Perbandingan aktivator pada pengujian binder dan beton geopolimer adalah 1:2 dan 1:3. Hasil riset menunjukkan nilai kuat tekan binder dan beton maksimum umur 28 hari sebesar 37,48 Mpa dan 60,09 Mpa terdapat pada variasi binder 10-3CR (curing oven) dengan rasio perbandingan NaOH : Na_2SiO_3 sebesar 1:3. Dari hasil analisa disimpulkan bahwa perawatan beton dengan curing oven memberikan kuat tekan maksimal, hal ini disebabkan karena tipe material pembentuk fly ash proses hidrasinya sangat lambat, jika perawatan menggunakan oven maka proses hidrasi berlangsung lebih cepat sehingga tingkat kekerasan beton geopolimer akan lebih cepat pula. Meningkatkan temperatur curing bisa mempercepat reaksi polimerisasi namun pada suhu tertentu kuat tekan mengalami penurunan karena sebagian air telah menguap sehingga kualitas beton geopolimer menjadi berkurang.

Kata kunci: *fly ash, geopolimer, sodium hidroksida, sodium silikat, curing time*

Abstract

This study discusses geopolymer concrete with fly ash material. Alkaline activator is known as Sodium Hydroxide (NaOH) and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) with molarity (10M). This study objection is to know the compressive strength comparison for geopolymer binder and concrete on the 28th day through two curing methods, that are left in the room temperature and using the oven on 60°C temperature for 24 hours. The testing series for this study are fly ash material, slump test, and compressive strength test. The activator ratio used for this study is 1:2 and 1:3. Test results show the maximum compressive strength for each binder and concrete are 37,48 MPa and 60,09 MPa, both exist in 10-3 CR variant on the 28th day with activator ratio 1:3. The analysis concludes that the 24 hours curing time in the 60°C temperature gives the maximum compressive strength to the concrete compared to the one that is left at room temperature. It happens because the fly ash-forming material has a very slow hydration process. While curing in the oven makes the hydration process goes faster so the hardness degree of geopolymer concrete will occur faster.

Keywords: *fly ash, geopolymer, sodium hydroxide, sodium silicate, curing time*

1. Latar Belakang

Permintaan beton sebagai bahan konstruksi terus meningkat seiring dengan perkembangan infrastruktur, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Untuk memenuhi permintaan tersebut, produksi semen portland harus meningkat. Penggunaan semen portland dewasa ini sering mendapat kritikan, terutama dari mereka yang peduli dengan kelestarian ekologi, karena pelepasan gas rumah kaca (karbon dioksida) yang dihasilkan selama proses pembuatan beton. Secara keseluruhan, pembuatan ordinary portland cement (OPC) diseluruh dunia menyumbang 5%-7% dari total pelepasan gas rumah kaca ke atmosfer (Saloni, Parveen, Yan Lim, *et al.*, 2021). Permasalahan di atas merupakan faktor pendorong para peneliti untuk mengkaji alternatif bahan lain yang dapat menggantikan peran semen dalam bahan campuran beton.

Beton ramah lingkungan (green concrete) saat ini menjadi tema utama dalam industri konstruksi. Upaya yang dapat dilakukan untuk menghindari pemakaian semen adalah dengan mengembangkan pembuatan beton geopolimer. Proses pembuatannya 100% tidak menggunakan semen portland. Bahan pengikat yang dapat dimanfaatkan bersumber dari pozzolan, antara lain fly ash, metakaolin, abu sekam atau bahan vulkanik (Davidovits, 2020). Di beberapa tahun terakhir peneliti telah berfokus untuk mengeksplorasi bahan pengikat alternatif untuk OPC seperti abu sekam padi, fly ash dan terak (Saloni, Parveen, Lim, *et al.*, 2021).

Fly ash merupakan bahan utama pembuatan binder yang didapat dari sisa pembakaran batubara. Beton geopolimer dengan bahan dasar fly ash bukan terbentuk dari reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional melainkan reaksi kimia (Davidovits, 2005). Pemilihan aktivator harus disesuaikan dengan campuran yang terkandung dalam fly ash, tujuannya agar terjadi reaksi kimia yang dapat mengikat agregat pembentuk beton. Aktivator yang sering digunakan adalah Na_2SiO_3 dan NaOH dengan konsentrasi antara 8M sampai 14M. Perbandingan Na_2SiO_3 dan NaOH bervariasi antara 0,4 sampai 2,5 (Hardjito *et al.*, 2004).

Pada tahun 1978, Joseph Davidovits mengembangkan bahan polimer anorganik dan menciptakan istilah "Geopolimer" yang berpotensi menggantikan beton semen portland biasa dan menghasilkan geopolimer berbasis fly ash beton dengan sifat fisik dan mekanik yang sangat baik. Geopolimer digunakan sebagai pengikat untuk sepenuhnya menggantikan semen portland biasa dalam memproduksi beton geopolimer.

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan kuat tekan terbaik beton geopolimer dengan proporsi campuran dan variabel uji yang berbeda. Penelitian (Davidovits, 1994) menyatakan bahwa pada temperatur ruang beton geopolimer dapat mengeras dengan cepat. Kuat tekan yang didapat setelah 4 jam perawatan sebesar 20 Mpa pada temperatur 20°C sedangkan umur 28 hari di kisaran 70 – 100 Mpa. Hasil eksplorasi (Aleem, M.I.A, Arumairaj, 2012) terkait uji geopolimer dengan proporsi campuran 1 fly ash, 1,5 pasir dan 3,3 agregat menggunakan campuran aktivator NaOH dan Na_2SiO_3 sebesar 0,35 dari berat fly ash dengan molaritas 10 M. Perawatan menggunakan metode steam pada temperatur 60°C selama 24 jam. Hasil pengujian kuat tekan umur 28 hari mencapai 53,33 Mpa. Hasil Riset (Manuahe, Sumajouw and Windah, 2014) menyatakan perlu dilakukan pemeriksaan lebih lanjut terhadap variasi molaritas Sodium Hidroksida (NaOH) dan korelasi antara Sodium Silikat terhadap Sodium Hidroksida untuk

memperoleh kuat tekan optimum, disamping itu perlu melakukan pengujian abu terbang dengan tipe yang berbeda sebagai solid material.

Berdasarkan referensi di atas akan dilakukan study eksperimental terkait beton geopolimer. Material utama yang dipakai adalah fly ash. Perbandingan aktivator NaOH terhadap Na₂SiO₃ sebesar (1:2 dan 1:3) dengan molaritas 10 M. Untuk perawatan beton masing-masing menggunakan 2 variasi yaitu dibiarkan dalam suhu ruang dan *curing time* 24 jam pada suhu 60°C. Dari komposisi di atas akan didapatkan perbandingan kuat tekan maksimum binder dan beton geopolimer di umur 28 hari berdasarkan variasi aktivator dan metode perawatan.

Pengembangan inovasi beton geopolimer masih sedikit dilakukan di Indonesia. Oleh sebab itu riset ini perlu ditindaklanjuti. Keberhasilan riset ini diharapkan dapat menambah referensi terkait penggunaan alternatif bahan pengganti semen yang ramah lingkungan dan dapat diaplikasikan di lingkungan masyarakat.

2. Metode Penelitian

2.1 Tahapan Penelitian

Fly ash merupakan bahan sumber alumino silikat yang digunakan untuk sintesis bahan pengikat geopolimer. Sumber fly ash berasal dari PLTU Tanjung Jati, Kabupaten Jepara, Jawa Tengah, Indonesia. Penguraian komposisi kimia fly ash menggunakan metode X-Ray Fluorescence.

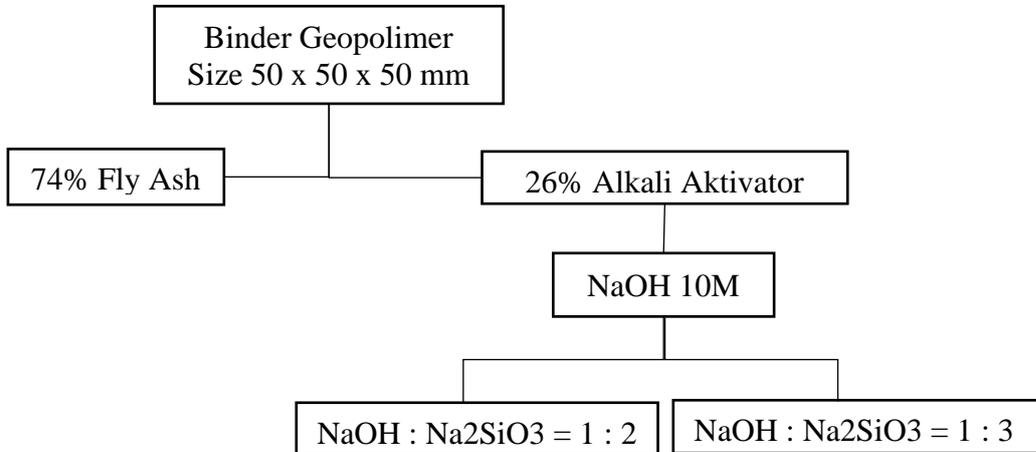
Aktivator alkali disiapkan di laboratorium. Untuk menghindari efek kontaminasi yang tidak diketahui, air suling digunakan untuk melarutkan Sodium Hidroksida. Aktivator alkali dibuat dengan mencampurkan larutan Sodium Hidroksida dengan larutan Sodium Silikat bersama-sama sebelum pencampuran mortar untuk memastikan reaktivitas larutan. Tujuan penambahan Sodium Silikat adalah untuk meningkatkan pembentukan prekursor geopolimer atau proses polimerisasi (H.Xu and Deventer, 2002).

Jenis pengujian yang akan dilaksanakan pada riset ini antara lain: Pemeriksaan agregat halus dan agregat kasar, pengecekan fly ash dengan metode X-Ray Fluorescence (XRF), test slump menggunakan kerucut abrams sesuai dengan ketentuan (ASTM-C39, 2010), tes kuat tekan binder dan beton geopolimer menggunakan mesin uji tekan dengan batas maksimum 2000 KN yang dilengkapi dengan CPU dan printer.

Hasil penelitian ini difokuskan pada komparasi kuat tekan binder dan beton geopolimer berdasarkan variasi benda uji yang dibuat yaitu dengan proporsi aktivator NaOH : Na₂SiO₃ masing-masing sebesar 1:2 dan 1:3. Tiap benda uji dirawat menggunakan 2 metode curing yaitu dibiarkan di dalam suhu ruang dan dimasukkan kedalam oven pada temperatur 60°C selama 24 jam. Dari hasil uji kuat tekan di umur 3, 7, 14 dan 28 hari akan diketahui variasi mana yang terbaik berdasarkan perbandingan aktivator dan jenis perawatan-perawatannya.

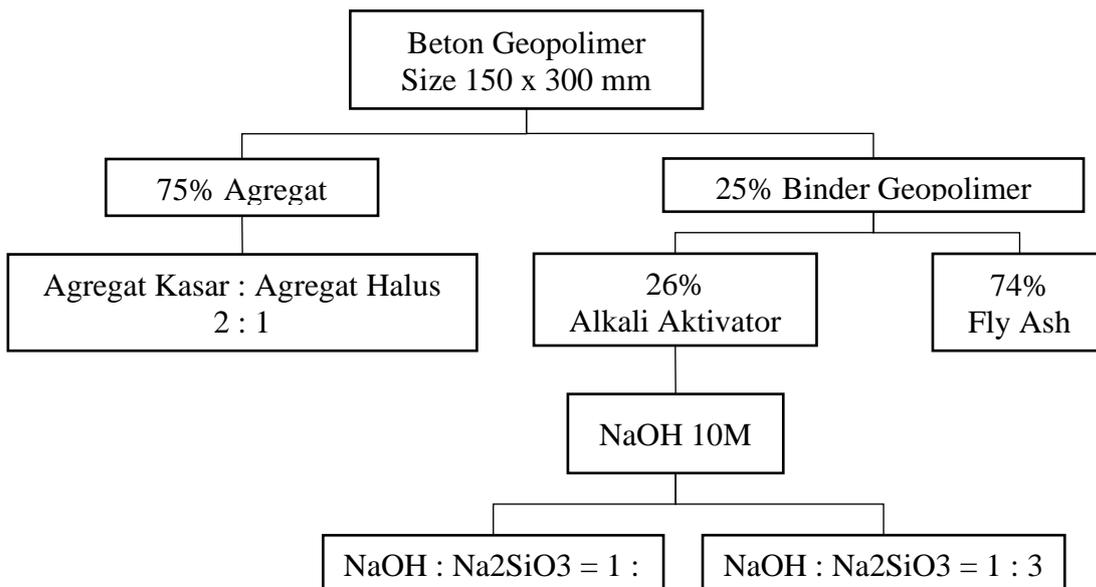
Sebelum penelitian dimulai, telah dilaksanakan percobaan trial binder geopolimer menggunakan fly ash. Trial ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi alkali yang akan digunakan pada mix desain beton geopolimer. Molaritas yang dipakai pada trial binder geopolimer sebesar 8M dan 10M dengan proporsi aktivator NaOH:Na₂SiO₃ sebesar 1:2 dan 1:3. Dari hasil percobaan binder didapat pencampuran fly ash dengan konsentrasi alkali 8 M memberikan hasil yang terlalu encer (binder dalam keadaan lembek) sehingga tidak dapat digunakan pada

percobaan ini. Dengan demikian maka konsentrasi alkali yang akan dipakai pada riset ini sebesar 10 M. Secara umum mix desain binder dan beton geopolimer seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Mix desain binder geopolimer

Tahap awal yang dilakukan untuk pembuatan binder geopolimer adalah membuat mix desain binder menggunakan cetakan kubus berukuran 50x50x50 mm. Binder digunakan sebagai pasta pengikat dengan mencampurkan fly ash sebanyak 74% dan alkali aktivator sebanyak 26%. Larutan NaOH yang digunakan dalam percobaan ini adalah 10 M dengan perbandingan molar larutan NaOH:Na₂SiO₃ sebesar 1:2 dan 1:3. Pada tahap pelaksanaan, fly ash dicampurkan dengan alkali aktivator menggunakan mixer kemudian hasil campuran dimasukkan kedalam cetakan binder dan dibiarkan selama 24 jam. Jika benda uji mengeras tahapan selanjutnya membuat beton geopolimer dan jika benda uji binder gagal percobaan bisa diulang kembali dengan mengubah komposisi perbandingan molar.



Gambar 2 Mix desain beton geopolimer

Tahapan selanjutnya yaitu membuat mix desain beton geopolimer. Benda uji yang digunakan berukuran 150 x 300 mm dengan komposisi perbandingan bahan sebesar 75% agregat dan 25% binder. Komposisi binder yang sudah berhasil dibuat pada tahap sebelumnya akan digunakan kembali pada pembuatan beton geopolimer. Pada tahap pelaksanaan, agregat halus dan kasar sebanyak 75% dari total beton geopolimer dicampur terlebih dahulu hingga merata kemudian ditambahkan fly ash dan alkali aktivator sebanyak 25%. Ketika campuran beton sudah merata, campuran dituang kedalam cetakan silinder dan dibiarkan selama 24 jam. Terdapat dua variasi pembuatan benda uji yaitu dengan molaritas 1:2 dan 1:3 untuk dipilih kuat tekan terbaik berdasarkan hasil uji.

2.2 Variasi Binder dan Beton Geopolimer

Pengujian kuat tekan binder dan beton geopolimer dilaksanakan pada umur 3, 7, 14 dan 28 hari menggunakan 3 buah sampel uji untuk setiap campuran. Jumlah total sampel uji yang diperlukan adalah 24 buah. Variasi binder dan beton geopolimer terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Variasi binder dan beton geopolimer

Kode Benda Uji	Perbandingan Aktivator NaOH : Na ₂ SiO ₃	Perawatan Beton (Curing)
Binder10-2 UT	1:2	Udara terbuka
Binder10-3 UT	1:3	-
Beton10-2 UT	1:2	-
Beton 10-3 UT	1:3	-
Binder 10-2 CR	1:2	Oven temperatur 60°C selama 24 jam
Binder 10-3 CR	1:3	-
Beton 10-2 CR	1:2	-
Beton 10-3 CR	1:3	-

2.3 Pengujian Binder dan Beton Geopolimer

Sebagaimana ditunjukkan oleh (SNI 1974, 2011) yang dimaksud dengan kuat tekan adalah besarnya beban persatuan luas yang menyebabkan benda uji hancur ketika ditumpuk dengan daya tekan tertentu. Pengujian kuat tekan menggunakan mesin uji tekanan dengan limit 2000 KN.

Metode pengujian Sebagian besar merupakan standar (ASTM C39/C39M, 2003). Kuat tekan setiap sampel uji dipengaruhi tegangan tekan paling tinggi (f'c) yang dicapai sampel uji pada umur 28 hari karena pengaruh beban tekan selama penyelidikan. Banyak parameter yang mempengaruhi kuat tekan beton termasuk sifat setiap bahan penyusunnya, faktor air semen (FAS) yang rendah serta kepadatan yang tinggi namun beton sangat kaku atau sulit dikerjakan (Sarkar *et al.*, 2016).

Sebagaimana ditunjukkan oleh (SNI 1974, 2011) yang dimaksud dengan kuat tekan adalah besarnya beban persatuan luas yang menyebabkan benda uji hancur ketika ditumpuk dengan daya tekan tertentu. Pengujian kuat tekan menggunakan mesin uji tekanan dengan limit 2000 KN

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

σ = kuat tekan (N/mm²)

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang (mm²)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Uji Fly Ash

Pemeriksaan Fly ash dilakukan di laboratorium Sucopindo dengan menggunakan metode uji X-Ray Fluorence (XRF), tujuannya untuk menentukan jenis zat senyawa yang terdapat di dalam material *Fly Ash* tersebut. Metode X-Ray Fluorence (XRF) adalah salah satu teknik analisis terbaik yang paling umum digunakan dalam memutuskan pengaturan senyawa yang berbeda dari berbagai jenis bahan, karena prosedur persiapan yang sederhana untuk dilakukan dan relatif cepat.

Tabel 2 Hasil uji bahan pembentuk *fly ash*

No	Kandungan Senyawa	Hasil Analisis (%)
1.	LOI	1,11
2.	Aluminium trioxide (Al ₂ O ₃)	22,54
3.	Iron trioxide (Fe ₂ O ₃)	11,32
4.	Calcium Oxide (CaO)	8,36
5.	Magnesium Oxide (MgO)	3,87
6.	Sulfur trioxide (SO ₃)	1,27
7.	Kalium oxide (K ₂ O)	1,82
8.	Silica dioxide (SiO ₂)	43,53
9.	Natrium oxide (Na ₂ O)	4,47

Dari hasil uji fly ash, terlihat bahan pembentuk fly ash tertinggi ada pada unsur silika, besi dan alumunia dengan kandungan unsur CaO sebesar 8,36%. Sesuai (ACI Manual of Concrete Practice parts 1 226.3R-3, 1993) Fly ash yang mengandung CaO di bawah 10% yang berasal dari pembakaran anthracite atau bitumen batu bara dikategorikan sebagai fly ash kelas F, diperkuat dengan klasifikasi dari (ASTM C-618-03, 2010) di mana fly ash \pm kelas F terdapat jumlah unsur aluminium, silikon dan besi yang lebih besar dari 70%, dalam pengujian ini, diamati bahwa kadar ketiga komponen ini lebih dari 70%.

3.2 Hasil Uji Slump

Teknik yang digunakan untuk mengetahui workability campuran beton adalah slump test. Semakin tinggi nilai slump berarti semakin tinggi workability beton karena lebih encer dan lebih mudah dibuat. Nilai slump yang lebih rendah disebabkan oleh setting time yang terjadi terlalu cepat, sehingga beton cukup sulit untuk dibuat. Nilai uji slump ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil uji slump

Variasi Beton	Nilai Slump [cm]
Beton 10-2	11
Beton 10-3	13

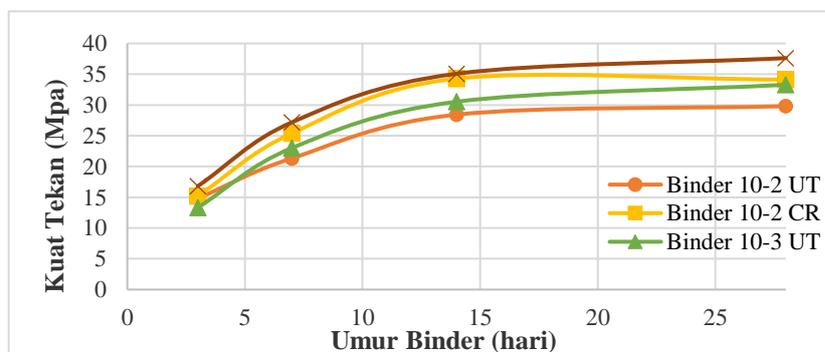
Hasil pengujian menunjukkan semakin tinggi proporsi aktivator NaOH (sodium hidroksida) dan Na₂SiO₃ (sodium silikat) maka nilai slump semakin meningkat, ini berarti beton semakin mudah untuk dikerjakan. Penelitian (Barbosa, V.F.F, K.J.D. MacKenzie, 2000) menyatakan bahwa kadar air berperan penting dalam campuran beton geopolimer, jumlah total kadar air dalam kombinasi adalah jumlah air dalam larutan NaOH ditambah massa air dalam larutan Na₂SiO₃ dan air yang ditambahkan selama pencampuran. Jadi semakin tinggi perbandingan aktivator yang digunakan dalam mix desain beton geopolimer menyebabkan peningkatan kebutuhan air dan mengakibatkan nilai slump menjadi tinggi.

3.3 Hasil Uji Kuat Tekan Binder & Beton Geopolimer

Berdasarkan hasil uji kuat tekan yang telah dilaksanakan dengan menggunakan benda uji berbentuk kubus 50 x 50 x 50 mm (binder geopolimer) dan silinder ukuran 150 x 300 mm (beton geopolimer) dengan variasi perawatan pada suhu ruangan dan di oven pada temperatur 60°C selama 24 jam, didapatkan hasil seperti diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil uji kuat tekan binder geopolimer perbandingan aktivator 1:2 dan 1:3

Variasi Binder	Rasio Aktivator	Kuat Tekan Rata-Rata [MPa]			
		3 hari	7 hari	14 hari	28 hari
Binder 10-2 UT	1:2	14,82	21,34	28,43	29,81
Binder 10-2 CR	1:2	15,21	25,40	34,29	34,12
Binder 10-3 UT	1:3	13,33	23,01	30,53	33,29
Binder 10-3 CR	1:3	16,82	27,19	35,08	37,62

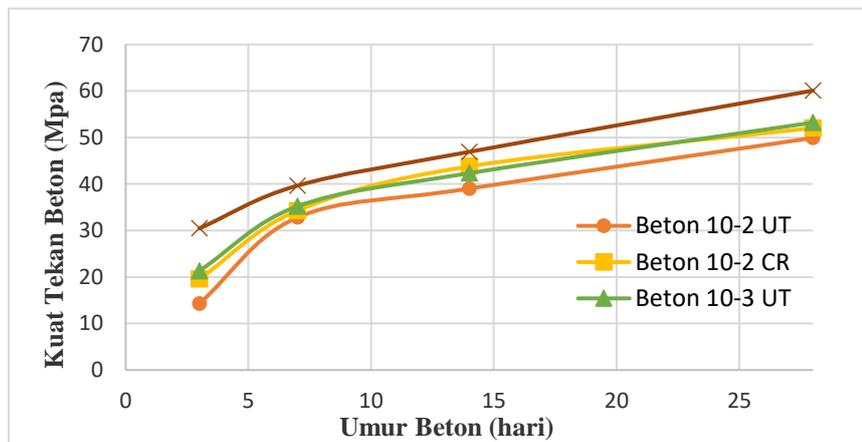


Gambar 3 Kombinasi kuat tekan binder geopolimer

Berdasarkan grafik uji binder diatas terlihat perbedaan hasil kuat tekan benda uji antara Binder 10-2 dan 10-3 dengan variasi perawatan udara terbuka dan di oven pada temperatur 60°C selama 24 jam. Secara keseluruhan dapat diamati kuat tekan binder geopolimer mengalami kenaikan dari umur 3 hari sampai dengan umur 28 hari. Dari keempat variasi binder nilai kuat tekan terbaik di umur 3, 7, 14 dan 28 hari terdapat pada variasi binder 10-3 CR dengan nilai kuat tekan tertinggi di umur 28 hari sebesar 37,62 Mpa. Secara konsisten terlihat binder yang menggunakan perbandingan aktivator 1:2 dan 1:3 dengan perawatan di oven pada temperatur 60°C selama 24 jam menghasilkan kuat tekan lebih tinggi jika dibandingkan dengan perawatan udara terbuka. Dari pembacaan grafik juga terlihat semakin tinggi perbandingan masa aktivator maka kuat tekan yang dicapai relatif lebih tinggi.

Tabel 5 Kombinasi kuat tekan beton geopolimer

Variasi Beton	Metode Perawatan	Rasio Aktivator	Kuat Tekan Rata-Rata [MPa]			
			3 hari	7 hari	14 hari	28 hari
Beton 10-2 UT	Udara Terbuka	1:2	14,28	32,81	39,02	49,91
Beton 10-2 CR	Oven suhu 60°C selama 24 jam	1:2	19,56	34,27	43,80	52,03
Beton 10-3 UT	Udara Terbuka	1:3	21,32	35,21	42,33	53,21
Beton 10-3 CR	Oven suhu 60°C selama 24 jam	1:3	30,46	39,65	46,92	60,09



Gambar 4 Kombinasi kuat tekan beton geopolimer

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer diatas secara keseluruhan kuat tekan beton geopolimer mengalami kenaikan dari umur 3 hari sampai dengan umur 28 hari. Dari gambar 4 dapat diamati bahwa beton yang dirawat menggunakan oven pada temperatur 60°C selama 24 jam dengan perbandingan aktivator 1:2 maupun 1:3 akan menghasilkan kuat tekan lebih tinggi jika dibandingkan dengan udara terbuka. Nilai kuat tekan tertinggi yang dihasilkan sebesar 60,09 Mpa terdapat terdapat pada variasi Beton 10-3 CR sedangkan nilai kuat tekan terendah terdapat pada variasi Beton 10-2 UT sebesar 49,91 Mpa. Dari grafik juga terlihat semakin tinggi perbandingan aktivator yang digunakan maka kuat tekan yang dihasilkan akan semakin tinggi juga.

3.4 Pembahasan dan Diskusi

3.4.1 Komparasi kuat tekan binder dan beton geopolimer

Pada gambar 3 dan 4 ditampilkan hasil kuat tekan binder dan beton geopolimer berdasarkan variasi perbandingan aktivator NaOH: Na₂SiO₃ sebesar 1:2 dan 1:3 dengan jenis perawatan udara terbuka dan di oven pada temperatur 60°C selama 24 jam. Terlihat bahwa variasi binder 10-3 CR dan beton 10-3 CR yang

dirancang dengan susunan NaOH 10M memberikan kuat tekan tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Hasil tersebut dipengaruhi oleh dua hal, yaitu perbandingan aktivator dan jenis perawatan yang digunakan. Secara umum dapat dikatakan bahwa semakin tinggi perbandingan aktivator yang digunakan maka kuat tekan yang dihasilkan binder dan beton geopolimer akan semakin tinggi. Jika beton memiliki aktivator Na_2SiO_3 dalam jumlah terbatas pada susunan larutan NaOH maka kuat tekan yang dicapai tidak maksimal. Rangkaian aktivator juga mempengaruhi workability saat pengecoran, jika larutan terlalu pekat pelaksanaan pengecoran menjadi sulit terutama saat pengadukan dan mengakibatkan penurunan kuat tekan (ASTM-C39, 2010).

Di sisi lain perawatan beton juga memainkan peranan penting untuk menghasilkan kuat tekan tinggi. Perawatan dengan temperatur memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap sifat dan karakteristik beton yaitu bisa meningkatkan kuat tekan pasta dan beton geopolimer. Tipe material pembentuk (*fly ash*) proses hidrasinya sangat lambat, jika perawatan menggunakan oven maka proses hidrasi akan berlangsung lebih cepat dibandingkan dengan perawatan pada suhu ruang sehingga tingkat kekerasan beton geopolimer akan lebih cepat pula. Alasan lebih detail terkait analisa perbandingan aktivator dan metode curing akan dijabarkan secara lengkap yang diambil dari beberapa sumber seperti berikut.

3.4.2 Ditinjau dari perbandingan aktivator

Dari hasil uji kuat tekan binder maupun beton geopolymer secara konsisten terlihat kuat tekan tertinggi yang dihasilkan diumur 28 hari terdapat pada variasi Binder 10-3 CR dan Beton 10-3 CR. Berdasarkan riset (Provis, J. L., Yong, C. Z., Duxson, P., & van Deventer, 2009) mengungkapkan bahwa peran NaOH dalam pengaturan formasi zeolite. Rangkaian Na_2SiO_3 dalam larutan aktivator sangat penting untuk meningkatkan kuat tekan, karena berfungsi mempercepat respon dalam rangkaian polimerisasi.

Pernyataan diatas diperkuat oleh riset (Palomo, Grutzeck and Blanco, 1999) yang mengatakan rasio larutan aktivator terhadap fly Ash bukan merupakan parameter yang relevan untuk meningkatkan kuat tekan beton polimer, ini berarti semakin besar perbandingan aktivator NaOH: Na_2SiO_3 yang digunakan dalam campuran akan meningkatkan kuat tekan beton geopolimer akan tetapi pada perbandingan tertentu kuat tekan akan mengalami penurunan jika perbandingan aktivator terlalu jauh.

3.4.3 Ditinjau dari Curing Temperature

Dari gambar 3 dan 4 terlihat bahwa kuat tekan maksimum terdapat pada variasi binder 10-3 CR dan beton 10-3 CR (di oven pada temperatur 60°C selama 24 jam) dengan molaritas NaOH 10M. Berdasarkan penelitian (Palomo, Grutzeck and Blanco, 1999) mengenai pengaruh curing dari berbagai temperatur kisaran $35-60^\circ\text{C}$ dengan prekursor fly ash, dikatakan bahwa dengan naiknya temperatur, respons polimerisasi terjadi lebih cepat dan menghasilkan kuat tekan yang meningkat. Berbeda dengan riset dari (Hardjito, Cheak and Lee Ing, 2008) mengungkapkan bahwa temperatur perawatan yang lebih tinggi tidak menjamin kuat tekan yang lebih tinggi pada umur 28 hari, namun jika suhu curing meningkat kuat tekan awal akan meningkat pula.

Hasil mortar geopolimer yang diawetkan pada suhu curing di atas 70°C akan mengakibatkan penurunan kuat tekan selama 24 jam perawatan. Hasil ini menunjukkan bahwa suhu perawatan memainkan peran penting dalam proses geopolimerisasi mortar geopolimer berbahan dasar fly ash. (Davidovits, 2005) menyatakan bahwa perawatan yang lebih lama akan menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Berdasarkan uraian diatas dapat dipastikan bahwa peningkatan temperatur curing dapat mempercepat respon polimerisasi sehingga kuat tekan binder dan beton geopolimer akan semakin tinggi, namun pada suhu tertentu kuat tekan tersebut akan mengalami penurunan dikarenakan sebagian air sudah menguap sehingga kualitas beton geopolymer menjadi berkurang.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian binder dan beton geopolimer diumur 28 hari, nilai kuat tekan tertinggi terdapat pada variasi Binder 10-3 CR dan Beton 10-3 CR masing-masing sebesar 37,62 Mpa dan 60,09 Mpa sedangkan kuat tekan terendah ada pada variasi Binder 10-2 UT dan Beton 10-2 UT masing-masing sebesar 29,81 Mpa dan 49,91 Mpa

Perawatan beton dengan temperatur 60°C selama 24 jam dapat memberikan kuat tekan maksimal dibandingkan udara terbuka, hal ini disebabkan tipe material pembentuk (fly ash) proses hidrasinya sangat lambat, jika perawatan menggunakan oven maka proses hidrasi akan berlangsung lebih cepat sehingga tingkat kekerasan beton geopolimer akan lebih cepat pula. Temperatur curing memegang peranan penting dalam proses geopolimerisasi, artinya suhu curing terlalu tinggi tidak menjamin kuat tekan yang lebih tinggi pada umur 28 hari akan tetapi jika suhu curing meningkat kuat tekan awal akan meningkat pula.

4.2 Saran

Diperlukan pemeriksaan lebih lanjut mengenai variasi molaritas Natrium Hidroksida (NaOH) dan proporsi Natrium silikat yang lebih tinggi terhadap Natrium Hidroksida untuk mendapatkan titik puncak optimum beton geopolimer sebelum kuat tekan mengalami penurunan. Larutan NaOH dengan panas tinggi mencapai 97°C dalam jumlah yang sangat besar menyebabkan kesulitan pada sistem pencampuran sehingga terkadang terjadi endapan sebagai tanda NaOH tidak terlarut sempurna. Pentingnya strategi atau prosedur untuk membuat larutan NaOH dalam jumlah banyak. Beton geopolimer ini sangat sulit dilakukan di lapangan karena setting time yang sangat cepat. Oleh karena itu, dibutuhkan bahan tambah untuk menghambat terjadinya pengikatan awal.

Ucapan Terima Kasih

Sebagai wujud penghargaan terhadap pihak-pihak yang terlibat dalam penyusunan jurnal ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Direktur Politeknik Pekerjaan Umum, Dosen Politeknik Pekerjaan Umum dan Team Lapangan yang telah membantu dalam proses penelitian ini.

Daftar Kepustakaan

- ACI Manual of Concrete Practice parts 1 226.3R-3, 1993. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy, Weight and Mass Concrete. Washington, D.C.
- Aleem, M.I.A, Arumairaj, P, 2012. Optimum Mix for Geopolymer Concrete, Indian Journal Of Science and Technology, Volume 5, (Number 3).
- ASTM-C39, 2010. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C-618-03, 2010. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C39/C39M, 2003. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1, ASTM Standard Book.
- Barbosa, V.F.F, K.J.D. MacKenzie, dan C. T, 2000. Sythesis Characterisation of Material Based on Inorganic Polymers of Alumina dan Silica: Sodium Polysialate Polimers, Journal of Inorganic Material, Vol. 2. No 4. Hal 309-317, Vol. 2(No 4), pp. 309–317.
- Davidovits, J, 1994. Properties of Geopolymer Cements, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, pp. 131–149.
- Davidovits, J, 2005. Geopolymer chemistry and sustainable development. The Poly (sialate) terminology : a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry, Geopolymer chemistry and sustainable Development., (July 2005).
- Davidovits, J, 2020. Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition, J. Davidovits.–Saint-Quentin, France.
- H.Xu and Deventer, J. V, 2002. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, International journal of mineral processing.
- Hardjito, D. et all, 2004. Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, Civil Engineering ..., 6(2), pp. 88–93. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/article/Civil-Engineering-Dimension/170455954.html>.
- Hardjito, D., Cheak, C. C. and Lee Ing, C. H, 2008. Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-based Geopolymer Mortar, Modern Applied Science, 2(4). doi: 10.5539/mas.v2n4p3.
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. J. and Windah, R. S, 2014. Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash), Jurnal Sipil Statik, 2(6), pp. 277–282.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. and Blanco, M. T, 1999. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future, Cement and Concrete Research, 29(8), pp. 1323–1329. doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9.

- Provis, J. L., Yong, C. Z., Duxson, P., & van Deventer, J. S, 2009. Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, 336(1-3)(57–63).
- Saloni, Parveen, Yan Lim, Y., et all, 2021. Influence of Portland cement on performance of fine rice husk ash geopolymer concrete: Strength and permeability properties, *Construction and Building Materials*, 300(July). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124321.
- Saloni, Parveen, Lim, Y. Y., et all, 2021. Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies, *Construction and Building Materials*, 283(March). doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122795.
- Sarkar, A. et all, 2016. Compressive Strength of Sustainable Concrete Combining Blast Furnace Slag and Fly Ash, p. 4.
- SNI 1974, 2011. Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder, Badan Standardisasi Nasional Indonesia.