



Analisis Pengaruh Prosedur Fabrikasi Terhadap Performa Kuat Tekan Dan Porositas Beton Geopolimer Pada Perawatan Suhu Ruang

Tiopan Pasaribu^{#a}, Marthin D. J. Sumajouw^{#b}, Ronny E. Pandaleke^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

^atyopasaribu01@gmail.com, ^bdody_sumajouw@unsrat.ac.id, ^cronny_pandaleke@yahoo.com

Abstrak

Beton geopolimer merupakan alternatif material konstruksi ramah lingkungan yang memanfaatkan limbah *fly ash* sebagai pengganti semen Portland sehingga dapat mengurangi emisi karbon pada sektor konstruksi. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi urutan pencampuran terhadap kuat tekan dan porositas beton geopolimer pada kondisi perawatan suhu ruang (*ambient curing*), serta menganalisis korelasi antara kedua parameter tersebut. Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium menggunakan *fly ash* Kelas C (kadar CaO 12,79%) dari PLTU II Amurang, dengan tiga prosedur fabrikasi: Variasi A (alkali bersama/*premixed*), Variasi B (alkali terpisah/*separated*), dan Variasi C (pasta dahulu). Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan pengujian porositas mengacu pada ASTM C642-06 pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Variasi B menghasilkan kuat tekan tertinggi dan meningkat konsisten dari 15,108 MPa (7 hari) menjadi 20,473 MPa (28 hari), sedangkan Variasi A (*premixed*) dan Variasi C (pasta dahulu) mengalami penurunan kuat tekan setelah umur 14 hari. Pada pengujian porositas, Variasi C (pasta dahulu) memiliki nilai terendah (8,672%), diikuti Variasi B (*separated*) (17,96%) dan Variasi A (*premixed*) (29,239%). Namun ditemukan ketidaknormalan pada Variasi C (pasta dahulu) yang memiliki porositas terendah namun kuat tekan terendah pula, yang mengindikasikan bahwa kepadatan matriks pasta tidak selalu berbanding lurus dengan kekuatan struktural apabila distribusi agregat tidak homogen akibat pengerasan awal (*flash setting*).

Kata kunci: beton geopolimer, *fly ash*, urutan pencampuran, kuat tekan, porositas

1. Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur di Indonesia terus meningkat seiring dengan peran strategis sektor konstruksi dalam mendukung konektivitas, pertumbuhan ekonomi, dan ketahanan nasional. Konstruksi pada umumnya masih menggunakan beton konvensional berbasis semen Portland, meskipun produksi semen Portland berkontribusi signifikan terhadap emisi karbon dioksida global (Mehta, 2001). Beton geopolimer berkembang sebagai alternatif material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dengan durabilitas tinggi terhadap serangan kimia, karena memanfaatkan material kaya silika dan alumina seperti *fly ash* yang diaktifkan dengan larutan aktivator alkali untuk membentuk matriks pengikat anorganik tanpa semen (Davidovits, 1991). Wilayah Sulawesi Utara memiliki ketersediaan *fly ash* yang melimpah dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) II Amurang, sehingga berpotensi besar dikembangkan sebagai bahan baku beton geopolimer berbasis sumber daya lokal.

Meskipun potensi karakteristik beton geopolimer sangat ideal untuk struktur, penerapannya di lapangan masih terbatas karena beberapa kendala: variasi prosedur fabrikasi sering menghasilkan performa kuat tekan dan porositas yang berbeda-beda, padahal kepadatan matriks (porositas rendah) krusial untuk mencegah penyerapan air; belum ada panduan prosedur fabrikasi (seperti urutan pencampuran) yang baku untuk meminimalkan risiko kegagalan campuran pada skala lapangan; dan banyak penelitian terdahulu masih mengandalkan pemanasan suhu tinggi (*oven curing*) untuk mencapai kinerja optimal, padahal metode ini sangat sulit diterapkan pada pekerjaan pengecoran langsung (*cast-in-place*) di lapangan.

Istilah geopolimer diperkenalkan oleh Davidovits (1991) untuk menggambarkan material anorganik hasil polimerisasi senyawa alumino-silikat melalui reaksi geokimia yang berlangsung dalam tiga fase: disolusi ion silikon dan aluminium dari *fly ash* oleh larutan alkali, transportasi-gelasi membentuk oligomer, serta polikondensasi yang membentuk jaringan gel *Sodium Aluminosilicate Hydrate* (N-A-S-H) pengikat kekuatan beton. *Fly ash* Kelas C berkalsium tinggi umumnya bereaksi lebih cepat namun berisiko mengalami pengerasan awal (*flash setting*) (Hardjito et al., 2005). Urutan pencampuran (*mixing order*) diketahui memengaruhi distribusi gel pengikat dan homogenitas matriks beton geopolimer (Hardjito et al., 2004), sementara variasi komposisi kimia *fly ash* antarsumber turut memengaruhi proses aktivasi dan sifat mekanik yang dihasilkan (Chindaprasirt, 2014). Kajian mengenai pengaruh *mixing order* pada kondisi *ambient curing* masih relatif terbatas dibandingkan kajian komposisi material, sehingga diperlukan penelitian yang lebih aplikatif pada aspek prosedur fabrikasinya.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi urutan pencampuran material terhadap nilai kuat tekan dan porositas beton geopolimer berbasis *fly ash* PLTU II Amurang pada kondisi perawatan suhu ruang, serta menganalisis korelasi antara kedua parameter tersebut. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis pengaruh prosedur fabrikasi, khususnya variasi urutan pencampuran, terhadap pencapaian kuat tekan struktural dan minimasi porositas pada kondisi *ambient curing* -- berbeda dengan mayoritas penelitian terdahulu yang bergantung pada *heat curing* yang pada dasarnya sulit diterapkan untuk pekerjaan *cast-in-place* di lapangan.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa aspek berikut: *fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU II Sulawesi Utara, Amurang dengan rasio kapur tohor 10% dari berat *fly ash*; agregat kasar berasal dari Tateli dan agregat halus (pasir) dari Klabat; aktivator alkali terdiri atas Natrium Hidroksida (NaOH) 12 M dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) dengan tambahan *superplasticizer* Sika ViscoCrete-3115N; benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm; pengaruh fluktuasi suhu ruangan dan kelembapan selama perawatan diabaikan; pengujian *workability* tidak dilakukan; dan pengujian kuat tekan dilaksanakan pada umur 7, 14, dan 28 hari sedangkan pengujian porositas hanya pada umur 28 hari mengikuti ASTM C642-06.

Penelitian ini melengkapi kajian sejenis pada laboratorium yang sama, yaitu Moedjiono (2024) yang berfokus pada pengaruh variasi molaritas KOH terhadap kuat tekan dan porositas beton geopolimer berbasis *fly ash*. Jika penelitian tersebut menyoroti aspek komposisi kimia aktivator, penelitian ini secara spesifik menyoroti aspek prosedur fabrikasi -- yakni urutan pencampuran material -- sebagai variabel bebas, sehingga kedua penelitian bersifat saling melengkapi dalam memetakan faktor-faktor penentu kualitas beton geopolimer berbasis *fly ash* lokal pada kondisi *ambient curing*.

2. Metode

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Struktur dan Material, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado. Benda uji dirawat pada kondisi suhu ruang (*ambient curing*) untuk merepresentasikan kondisi nyata di lapangan sehingga hasilnya dapat diimplementasikan secara praktis pada proyek konstruksi.

2.1. Material dan Benda Uji

Material yang digunakan meliputi *fly ash* lokal dari PLTU II Amurang, kapur tohor (10% dari berat *fly ash*), agregat kasar dari Tateli, agregat halus (pasir) dari Klabat, larutan aktivator alkali berupa Natrium Hidroksida (NaOH 12 M) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3), *superplasticizer* Sika ViscoCrete-3115N, serta air dari Laboratorium Struktur dan Material Fakultas Teknik Unsrat. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm, dengan total 39 sampel: 36 sampel untuk pengujian kuat tekan (3 variasi $\times$ 3 umur pengujian $\times$ 4 ulangan) dan 3 sampel untuk pengujian porositas (3 variasi $\times$ 1 sampel). Perencanaan campuran mengacu pada Pesik et al. (2018) dengan kuat tekan rencana 20 MPa, dengan modifikasi berupa substitusi 10% kapur dari total *fly ash*. Komposisi campuran per meter kubik disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Rancang Campur (Mix Design) Beton Geopolimer per m³

Material	Berat (kg/m ³)	Persentase (%)
Agregat Kasar	1294	46,35
Pasir Halus	554	19,84
Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>)	428,4	15,34
Kapur	47,6	1,70
Natrium Hidroksida	120	4,30
Natrium Silikat	300	10,75
<i>Superplasticizer</i>	12,2	0,44
Air	35,6	1,28
Total	2791,8	100

2.2. Prosedur Fabrikasi (Urutan Pencampuran)

Tiga variasi urutan pencampuran diuji untuk mengamati pengaruh prosedur fabrikasi terhadap kinerja beton geopolimer, sebagaimana diringkas pada Tabel 2.

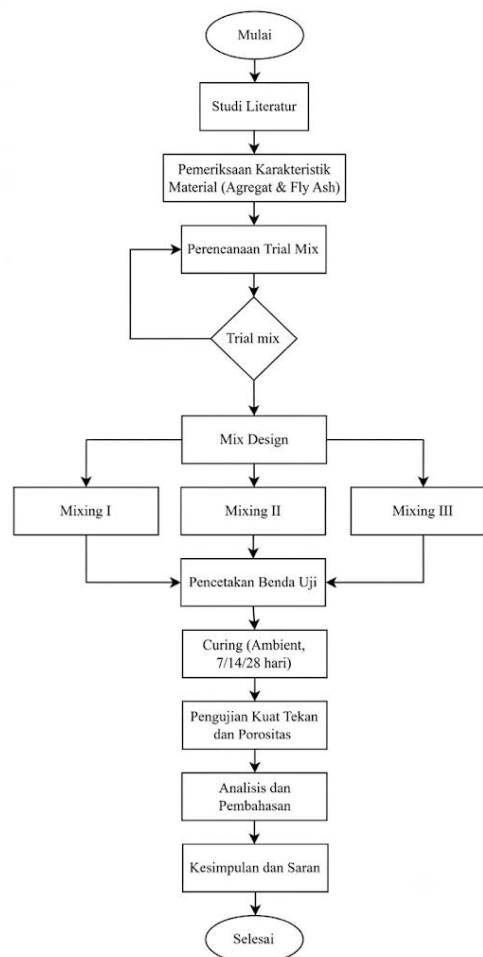
Tabel 2. Ringkasan Prosedur Fabrikasi Tiga Variasi Urutan Pencampuran

Variasi	Tahapan Pencampuran	Durasi
A (<i>Premixed</i>)	Persiapan larutan aktivator (NaOH + Na ₂ SiO ₃ didiamkan 24 jam) → dicampur ke <i>dry mix</i> (<i>fly ash</i> /kapur/agregat) → pengadukan basah (larutan aktivator + <i>superplasticizer</i> + air)	5 + 1 menit
B (<i>Separated</i>)	<i>Fly ash</i> /kapur/agregat + NaOH diaduk → ditambahkan Na ₂ SiO ₃ + <i>superplasticizer</i> + air	5 + 3 menit
C (<i>Pasta Dahulu</i>)	<i>Fly ash</i> /kapur + NaOH dibuat pasta → ditambah Na ₂ SiO ₃ + <i>superplasticizer</i> + air → dimasukkan agregat	4 + 1 + 1 menit

Setiap variasi dibuat dalam 4 benda uji untuk menjamin keterulangan data. Campuran beton segar dituangkan ke dalam cetakan silinder, dibuka setelah 24 jam, kemudian dirawat pada suhu ruang hingga mencapai umur pengujian 7, 14, dan 28 hari.

2.3. Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui tahapan sistematis yang meliputi studi literatur; persiapan bahan dan peralatan (agregat, *fly ash*, kapur, *superplasticizer*, serta alkali aktivator); karakterisasi mutu agregat kasar dan halus sesuai regulasi SNI dan ASTM; perencanaan komposisi campuran mengadopsi formulasi Pesik et al. (2018); uji coba campuran awal (*trial mix*) yang ditetapkan sebagai komposisi final setelah memenuhi parameter persyaratan; pencampuran material ke dalam molen sesuai urutan variasi yang direncanakan; pencetakan benda uji ke dalam cetakan silinder; pembukaan cetakan (*demolding*) setelah 24 jam; perawatan pada suhu ruang hingga umur pengujian target; pengujian kuat tekan dan porositas; serta analisis data dan penyusunan kesimpulan. Alat utama yang digunakan meliputi mesin pengaduk beton (*mixer*), cetakan benda uji silinder, timbangan digital, *sample splitter*, saringan agregat, piknometer, kerucut Abrams, oven, mesin *sieve shaker*, mesin Los Angeles, serta mesin *vibrator* beton untuk memadatkan campuran dan mengeluarkan gelembung udara. Diagram alir penelitian secara keseluruhan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.4. Analisis Data

Data kuat tekan dan porositas dianalisis secara deskriptif-kuantitatif. Nilai kuat tekan pada setiap kombinasi variasi dan umur pengujian dihitung sebagai rata-rata dari empat benda uji ulangan untuk meminimalkan pengaruh variabilitas material dan kesalahan pengujian acak. Hasil rata-rata setiap variasi kemudian dibandingkan secara deskriptif antarvariasi dan antarmur untuk mengidentifikasi tren peningkatan atau penurunan kekuatan, serta disandingkan dengan hasil porositas pada umur 28 hari guna mengevaluasi konsistensi hubungan antara porositas dan kuat tekan pada tiap prosedur fabrikasi. Data disajikan dalam bentuk tabel rekapitulasi dan grafik batang maupun diagram sebar (*scatter plot*) untuk mempermudah interpretasi pola dan anomali antarvariasi.

2.5. Metode Pengujian

Karakterisasi agregat mengacu pada SNI 03-1969-1990, SNI 03-1970-1990, SNI 1971:2011, SNI 03-1968-1990, dan SNI 03-2417-1991 beserta padanan ASTM-nya (ASTM C127-01, ASTM C566-97, ASTM C33-99, ASTM C131-03), sedangkan komposisi kimia *fly ash* dianalisis menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF). Pengujian kuat tekan dilakukan pada mesin *compression test* mengikuti SNI 1974:2011 dengan permukaan benda uji di-*capping* menggunakan mortar belerang untuk menjamin distribusi beban aksial yang merata, pada umur 7, 14, dan 28 hari. Pengujian porositas mengikuti ASTM C642-06 pada umur 28 hari: satu benda uji per variasi dipotong menjadi tiga bagian, dikeringkan dalam oven (100-110°C, minimal 24 jam) untuk memperoleh massa kering (A), direbus minimal 5 jam dan direndam minimal 14 jam untuk memperoleh massa jenuh permukaan kering (C), serta ditimbang di dalam air untuk memperoleh massa hidrostatik (D). Nilai porositas dihitung dengan persamaan:

$$\text{Porositas} = [(C - A) / (C - D)] \times 100\% \quad (1)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Material

Hasil pengujian menunjukkan agregat halus memiliki modulus kehalusan 2,827 (memenuhi SNI 8321:2016, rentang 2,3-3,1) dengan absorpsi 10,717% dan kadar lumpur 0,867% (di bawah ambang 5%), sedangkan agregat kasar memiliki modulus kehalusan 6,873 (memenuhi ASTM C33/C33M-13, rentang 6-7%), absorpsi 1,972%, dan keausan Los Angeles 33,46% (di bawah ambang 50% menurut SNI 8321:2016). Secara keseluruhan, kedua agregat memenuhi standar untuk digunakan sebagai material beton struktural (Neville, 2011).

Gradasi agregat halus dan kasar hasil analisis saringan menunjukkan kurva distribusi ukuran butir yang berada dalam batas gradasi standar sesuai SNI 03-1968-1990, sehingga rongga antarbutir dapat terisi secara optimal oleh pasta *fly ash*-aktivator pada seluruh variasi campuran. Nilai berat jenis (*specific gravity*) agregat kasar dan halus yang diperoleh juga berada pada rentang normal untuk agregat batuan alam, sehingga kombinasi agregat lokal dari Tateli dan Klabat dinilai layak dipakai secara berkelanjutan sebagai material penyusun beton geopolimer skala laboratorium maupun aplikasi lapangan skala kecil. Kesesuaian karakteristik agregat dengan standar ini penting untuk memastikan bahwa variasi kinerja mekanik yang teramati pada penelitian ini murni disebabkan oleh perbedaan prosedur fabrikasi, bukan oleh mutu agregat yang tidak konsisten antarvariasi.

Hasil uji XRF yang dilaksanakan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Sam Ratulangi menunjukkan *fly ash* PLTU II Amurang memiliki kadar Kalsium Oksida (CaO) 12,79% dan akumulasi $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 54,58%, sehingga tergolong *fly ash* Kelas C berkalsium tinggi yang memenuhi kriteria ASTM C-618 dan ACI *Manual of Concrete Practice* 226.3R-3, yang mensyaratkan kandungan kalsium di atas 10% dan total senyawa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ melebihi 50%. Komposisi kimia lengkap *fly ash* disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi Kimia Fly Ash PLTU II Amurang Hasil Uji XRF

Senyawa	Persentase (%)	Senyawa	Persentase (%)
SiO_2	32,30	MgO	7,56
Al_2O_3	13,38	TiO_2	0,49
Fe_2O_3	8,90	Cr_2O_3	0,07
CaO	12,79	Co	0,07
MnO	0,08	Zn	0,03

Uji coba campuran awal (*trial mix*) dilaksanakan sebanyak tiga kali pengulangan untuk memperoleh komposisi rancang campur yang optimal, dengan kuat tekan tertinggi pada percobaan diperoleh sebesar 23,56 MPa pada campuran Variasi A (*premixed*). Berat volume rata-rata seluruh benda uji disajikan pada Tabel 4 berdasarkan klasifikasi SNI 2847:2019.

Tabel 4. Berat Volume Rata-rata Beton Geopolimer (kg/m^3) pada Setiap Umur Pengujian

Variasi	Berat Volume 7 Hari	Berat Volume 14 Hari	Berat Volume 28 Hari
A (<i>Premixed</i>)	2160,43	2168,04	2169,93
B (<i>Separated</i>)	2164,24	2163,31	2176,27
C (Pasta Dahulu)	2051,20	2129,37	2174,95

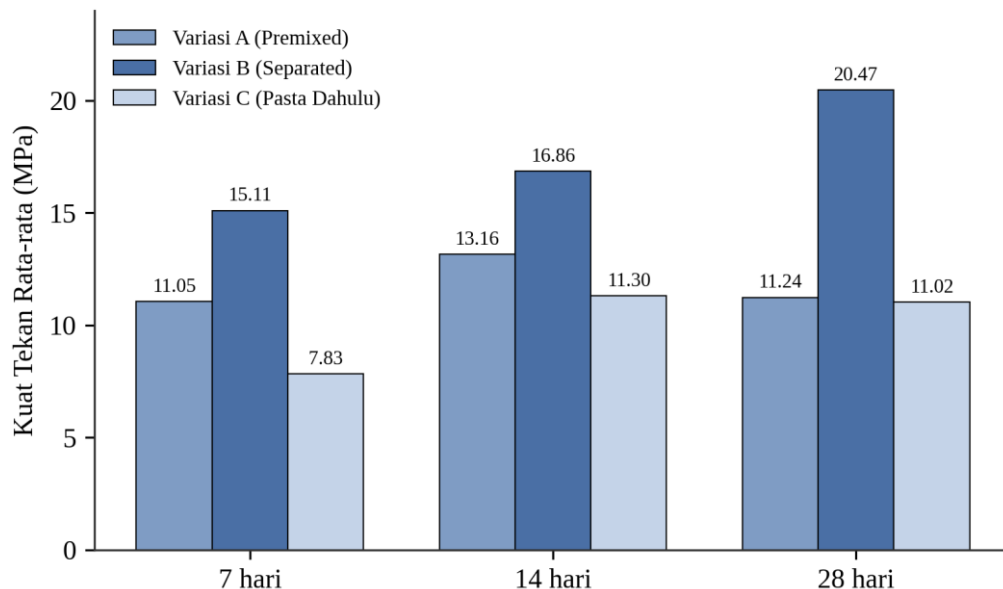
Nilai berat volume seluruh variasi dan umur berkisar antara 2051-2176 kg/m^3 , yang menurut klasifikasi SNI 2847:2019 tergolong beton normal (kisaran 2155-2560 kg/m^3) meskipun Variasi C (pasta dahulu) pada umur 7 hari sedikit berada di bawah rentang tersebut akibat rongga udara yang lebih besar sebelum matriks pasta mengeras sempurna. Karena rentang berat volume antarvariasi relatif sempit, hasil kuat tekan yang diperoleh dapat dibandingkan secara konsisten antarvariasi tanpa dipengaruhi perbedaan berat jenis yang signifikan (Mulyono, 2004).

3.2. Pengaruh Prosedur Fabrikasi terhadap Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk ketiga variasi disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 2.

Tabel 5. Kuat Tekan Rata-rata Beton Geopolimer pada Umur 7, 14, dan 28 Hari

Variasi	7 hari (MPa)	14 hari (MPa)	28 hari (MPa)
A (<i>Premixed</i>)	11,050	13,160	11,240
B (<i>Separated</i>)	15,108	16,860	20,473
C (Pasta Dahulu)	7,830	11,305	11,020

**Gambar 2.** Kuat Tekan Rata-rata Beton Geopolimer per Variasi pada Umur 7, 14, dan 28 Hari

Variasi B (*separated*) menunjukkan tren paling konsisten: kuat tekan meningkat terus-menerus dari 15,108 MPa (7 hari) menjadi 20,473 MPa (28 hari), tertinggi di antara ketiga variasi. Hal ini terjadi karena pada prosedur ini agregat terlebih dahulu terbasahi secara bertahap oleh NaOH sebelum Na_2SiO_3 ditambahkan sebagai pengikat, sehingga proses pelarutan ion silika-alumina dari *fly ash* berlangsung lebih terkendali dan gel pengikat terbentuk lebih merata (Hardjito et al., 2004). Sebaliknya, Variasi A (*premixed*) dan Variasi C (pasta dahulu) menunjukkan pola kuat tekan yang naik pada umur 14 hari lalu menurun pada umur 28 hari (Variasi A (*premixed*) dari 13,16 MPa menjadi 11,24 MPa; Variasi C dari 11,305 MPa menjadi 11,02 MPa). Pada Variasi C (pasta dahulu), hal ini disebabkan pasta *fly ash*-aktivator yang telah terbentuk lebih dahulu mengalami pengerasan awal (*flash setting*) sebelum agregat sempat dicampurkan secara merata, sehingga distribusi agregat ke dalam matriks pasta menjadi tidak homogen dan kekuatan strukturalnya rendah. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa urutan pencampuran -- bukan hanya komposisi material -- merupakan faktor determinan performa mekanik beton geopolimer berkalsium tinggi pada kondisi *ambient curing*. Nilai kuat tekan Variasi B (*separated*) pada umur 28 hari (20,473 MPa) sejalan dengan capaian Pesik et al. (2018) pada laboratorium yang sama, yang memperoleh kuat tekan rencana serupa untuk beton geopolimer *ambient curing* berbasis *fly ash*, serta konsisten dengan temuan Nath dan Sarker (2014) bahwa pengaturan urutan pencampuran dan komposisi aktivator berpengaruh signifikan terhadap kekuatan awal beton geopolimer yang dirawat pada suhu ruang.

Pada aspek perkembangan kekuatan dini (umur 7-14 hari), ketiga variasi menunjukkan peningkatan kuat tekan, mengindikasikan bahwa reaksi geopolimerisasi awal berlangsung pada seluruh prosedur fabrikasi tanpa terkecuali. Perbedaan signifikan baru tampak nyata pada umur 14 menuju 28 hari, saat Variasi B (*separated*) terus mengalami penguatan matriks melalui polikondensasi lanjutan, sementara Variasi A (*premixed*) dan Variasi C (pasta dahulu) mengalami stagnasi bahkan penurunan. Penurunan kuat tekan pada rentang umur tersebut mengindikasikan kemungkinan mikroretak internal akibat tegangan susut yang tidak merata pada matriks yang telah mengeras lebih dahulu (*flash setting*), sebuah gejala yang tidak muncul apabila proses pembasahan material berlangsung bertahap seperti pada Variasi B (*separated*). Fenomena ini

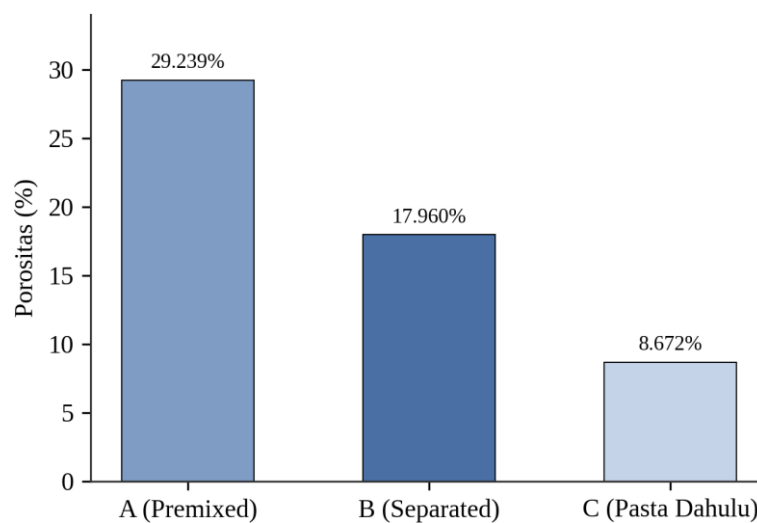
menegaskan bahwa pemantauan kuat tekan pada rentang umur menengah ke akhir sama pentingnya dengan capaian pada umur 28 hari itu sendiri, khususnya untuk mendeteksi potensi degradasi akibat prosedur fabrikasi yang kurang tepat.

3.3. Pengaruh Prosedur Fabrikasi terhadap Porositas

Pengujian porositas mengacu pada ASTM C642-06 pada umur 28 hari. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6 dan Gambar 3.

Tabel 6. Nilai Porositas Beton Geopolimer pada Umur 28 Hari

Variasi	Porositas (%)
A (<i>Premixed</i>)	29,239
B (<i>Separated</i>)	17,960
C (Pasta Dahulu)	8,672

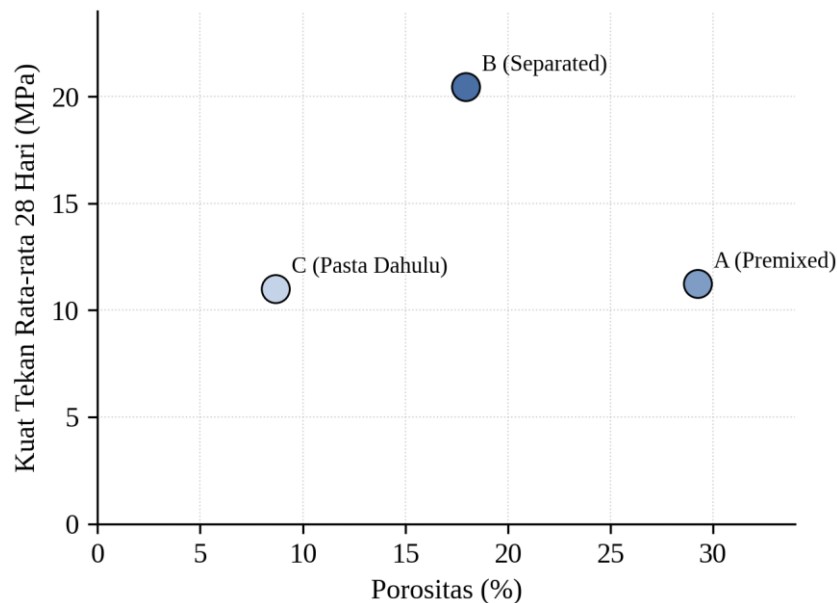


Gambar 3. Porositas Beton Geopolimer per Variasi pada Umur 28 Hari

Variasi C (pasta dahulu) menghasilkan porositas terendah (8,672%), diikuti Variasi B (*separated*) (17,96%) dan Variasi A (*premixed*) (29,239%). Pola ini berkebalikan dengan pola kuat tekan, karena pembentukan pasta *fly ash*-alkali terlebih dahulu pada Variasi C (pasta dahulu) menghasilkan matriks pasta yang lebih rapat sebelum agregat dimasukkan. Variasi A (*premixed*) memiliki porositas tertinggi karena kontak awal aktivator hanya dengan sebagian material sebelum tercampur sempurna dengan seluruh *dry mix*, sehingga rongga udara lebih banyak terperangkap selama pengadukan. Kapur tohor yang ditambahkan pada seluruh variasi turut berperan sebagai penyedia ion kalsium pembentuk gel Kalsium Silika Hidrat (C-S-H) atau Kalsium Aluminosilika Hidrat (C-A-S-H) yang mengisi pori-pori dan rongga kapiler, sehingga menurunkan porositas beton secara umum (Temuujin et al., 2009).

3.4. Korelasi Kuat Tekan dan Porositas

Secara umum, porositas berbanding terbalik dengan kuat tekan: semakin tinggi porositas maka semakin rendah kekuatan mekanik beton (Sultan, 2019). Hubungan antara kedua parameter untuk ketiga variasi pada umur 28 hari disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara Porositas dan Kuat Tekan Rata-rata pada Umur 28 Hari

Hal ini konsisten dengan perbandingan Variasi A (*premixed*) dan Variasi B (*separated*), di mana Variasi A (*premixed*) yang berporositas lebih besar (29,239%) memiliki kuat tekan lebih rendah (11,24 MPa) dibandingkan Variasi B (*separated*) yang berporositas lebih kecil (17,96%) dengan kuat tekan lebih tinggi (20,473 MPa). Namun, ditemukan ketidaknormalan pada Variasi C (pasta dahulu): meskipun memiliki porositas terkecil (8,672%), variasi ini justru menghasilkan kuat tekan terendah (11,02 MPa) di antara ketiga variasi, sehingga titik data Variasi C (pasta dahulu) menyimpang dari tren linear yang dibentuk oleh Variasi A (*premixed*) dan B (*separated*) pada Gambar 5. Ketidaknormalan ini mengindikasikan bahwa nilai porositas yang rendah pada Variasi C (pasta dahulu) hanya merepresentasikan kepadatan internal fase pasta (*binder*) itu sendiri, bukan kepadatan matriks beton secara keseluruhan. Karena pasta *fly ash*-aktivator pada Variasi C (pasta dahulu) sudah mulai mengeras (*flash setting*) sebelum agregat dicampurkan, ikatan antara pasta dan agregat tidak terbentuk dengan baik sehingga timbul kelemahan struktural pada zona transisi antarmuka (*Interfacial Transition Zone/ITZ*) antara pasta dan agregat. Cacat distribusi agregat inilah yang menyebabkan beton runtuh pada beban yang jauh lebih rendah meskipun matriks pastinya sendiri padat. Temuan ini menunjukkan bahwa kepadatan matriks pasta geopolimer tidak selalu berbanding lurus dengan kekuatan struktural apabila distribusi agregat di dalam pasta tidak homogen -- sebuah pertimbangan penting dalam merancang prosedur fabrikasi beton geopolimer berkalsium tinggi untuk aplikasi lapangan, dan menjadi pembeda utama penelitian ini terhadap kajian porositas-kekuatan pada beton konvensional (Sultan, 2019) yang umumnya mengasumsikan hubungan tersebut selalu monoton.

4. Kesimpulan

Urutan pencampuran (*mixing order*) terbukti berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan dan porositas beton geopolimer berbasis *fly ash* PLTU II Amurang pada kondisi *ambient curing*. Variasi B (alkali terpisah/*separated*) merupakan prosedur fabrikasi paling optimal untuk kuat tekan, dengan peningkatan konsisten dari 15,108 MPa (7 hari) hingga 20,473 MPa (28 hari), karena agregat terbasahi oleh air dan larutan aktivator secara bertahap. Sebaliknya, Variasi A (alkali bersama/*premixed*) dan terutama Variasi C (pasta dahulu) mengalami penurunan kuat tekan setelah umur 14 hari akibat pengerasan awal (*flash setting*) yang mengganggu homogenitas distribusi agregat. Untuk porositas, Variasi C (pasta dahulu) menghasilkan nilai terendah (8,672%), diikuti Variasi B (*separated*) (17,96%) dan Variasi A (*premixed*) (29,239%) -- pola yang berkebalikan dengan pola kuat tekan. Ditemukan ketidaknormalan pada Variasi C (pasta dahulu) yang memiliki porositas terendah namun kuat tekan terendah pula, yang mengonfirmasi bahwa rendahnya porositas pada variasi ini hanya merepresentasikan kepadatan fase pasta, bukan kekuatan matriks beton secara keseluruhan, akibat lemahnya zona transisi antarmuka pasta-

agregat. Dengan demikian, prosedur fabrikasi dengan pembasahan agregat secara bertahap (Variasi B/*separated*) lebih disarankan untuk aplikasi struktural beton geopolimer berbasis *fly ash* berkalsium tinggi pada kondisi *ambient curing*, sedangkan metode pasta dahulu (Variasi C/pasta dahulu) meskipun unggul dalam kepadatan matriks perlu dikaji lebih lanjut sebelum diterapkan pada elemen struktural yang menahan beban tekan tinggi. Secara lebih luas, temuan ini memperkuat kelayakan pemanfaatan *fly ash* lokal PLTU II Amurang sebagai bahan baku konstruksi berkelanjutan di Sulawesi Utara, dengan catatan bahwa keberhasilan penerapannya di lapangan sangat bergantung pada kedisiplinan pelaksanaan prosedur fabrikasi, tidak hanya pada ketepatan komposisi rancang campur semata.

5. Saran

Beberapa saran dapat disampaikan untuk penyempurnaan penelitian ini serta pengembangan implementasi praktis beton geopolimer di lapangan. Pertama, konsistensi parameter pengadukan -- baik kecepatan (*rpm*) *mixer*, durasi, suhu, maupun metode pencampuran -- perlu dijaga secara ketat pada setiap variasi guna meminimalkan bias data akibat perlakuan yang tidak homogen. Kedua, untuk mengatasi kendala mekanis berupa pasta yang mengeras cepat pada Variasi C (pasta dahulu), penelitian selanjutnya disarankan menggunakan mesin pengaduk dengan kapasitas torsi dan energi pengadukan yang lebih tinggi (*high-shear mixer*) agar agregat dapat terdistribusi merata ke dalam pasta yang mulai mengental. Ketiga, mengingat penelitian ini tidak mencakup pengujian tingkat kemudahan pengerjaan, penelitian selanjutnya sangat disarankan memasukkan parameter *slump test* sebagai prosedur wajib pada beton segar untuk melengkapi karakterisasi kinerja campuran. Keempat, karena penelitian ini tidak mencatat pengaruh fluktuasi suhu ruangan dan kelembapan laboratorium, penelitian lanjutan disarankan mengondisikan dan mencatat parameter lingkungan perawatan (*curing*) secara harian agar pengaruhnya terhadap laju polimerisasi dapat dianalisis lebih akurat. Kelima, mengingat motivasi lingkungan yang mendasari pengembangan beton geopolimer (Mehta, 2001), penelitian selanjutnya juga disarankan melengkapi kajian teknis ini dengan estimasi kuantitatif potensi reduksi emisi karbon serta analisis kelayakan biaya produksi beton geopolimer berbasis *fly ash* PLTU II Amurang dibandingkan beton konvensional berbasis semen Portland, sehingga manfaat lingkungan yang diperoleh dapat dikuantifikasi secara utuh bersamaan dengan capaian kinerja mekanisnya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PLTU II Sulawesi Utara (Amurang) atas izin pengambilan *fly ash* untuk keperluan penelitian ini, serta kepada Laboratorium Rekayasa Struktur dan Material, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado, atas fasilitas dan bantuan teknis selama pelaksanaan pengujian laboratorium. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen penguji atas masukan dan arahan yang berharga selama proses penyusunan penelitian ini, serta kepada rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi yang telah membantu pelaksanaan pengujian di laboratorium hingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Referensi

- ASTM C33-99. (1999). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International.
- ASTM C117-13. (2013). *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. ASTM International.
- ASTM C127-01. (2001). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. ASTM International.
- ASTM C131-03. (2003). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. ASTM International.
- ASTM C566-97. (1997). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. ASTM International.
- ASTM C642-06. (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International.
- Chindaprasirt, P. (2014). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 224–229.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*,

37(8), 1633–1656.

Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.

Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *ACI Concrete International*, 23(10), 61–66.

Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Penerbit Andi.

Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171.

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.

Pesik, J., Sumajouw, M. D. J., & Pandaleke, R. E. (2018). Karakteristik mekanik beton geopolimer dengan perawatan suhu ruangan (*ambient curing*). *Jurnal Tekno*, 16(69).

SNI 03-1968-1990. *Metode Pengujian tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 03-1969-1990. *Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 03-1970-1990. *Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 03-2417-1991. *Metode Pengujian Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1971:2011. *Cara Uji Kadar Air Total Agregat dengan Pengeringan*. Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1974:2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Badan Standardisasi Nasional.

Sultan, M. I. (2019). Korelasi porositas beton terhadap kuat tekan rata-rata. *Teknologi Sipil: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 2.

Sumajouw, M. D. J., & Supit, D. S. (2023). *Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolimer*. CV Patra Media Grafindo.

Temuujin, J., van Riessen, A., & Williams, R. (2009). Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 82–88.