



STUDI MIKROSTRUKTUR BETON RINGAN GEOPOLIMER DENGAN SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (SEM) DAN X-RAY DIFFRACTION (XRD)

Adji Utama*, Nurnilam Oemiati

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang

*Corresponding Author, Email : adji_sutama@um-palembang.ac.id

ABSTRAK

Beton ringan geopolimer merupakan salah satu beton yang ramah lingkungan karena proses pembuatannya memanfaatkan prekursor yang berasal dari alam dan/atau limbah seperti kaolin, abu terbang, dan pozzolan lainnya. Beton ringan geopolimer ini juga termasuk jenis beton inovasi yang memadukan kelebihan beton ringan dan beton geopolimer. Penelitian ini menggunakan material yang terdiri dari prekursor, larutan alkali aktivator, agregat halus, superplasticizer, dan foam dengan target berat jenis beton $\leq 1500 \text{ kg/m}^3$. Prekursor terdiri dari kaolin dan abu terbang dengan persentase kaolin 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat abu terbang. Perbandingan larutan Na_2SiO_3 dan NaOH 2,5:1 dengan konsentrasi NaOH 12 M dan 14 M. Perbandingan larutan alkali aktivator dan prekursor sebesar 0,5. Perbandingan agregat halus dan prekursor sebesar 2. Untuk memproduksi foam digunakan perbandingan foaming agent dan air 1:40 dengan presentase foam 50% dari volume campuran. Perawatan benda uji dilakukan selama 24 jam pada suhu oven 60°C . Hasil pengujian kuat tekan beton menunjukkan bahwa campuran BRG-0%-14M menghasilkan kuat tekan yang paling optimum sebesar 19,20 MPa dengan berat jenis beton $1481,12 \text{ kg/m}^3$. Hasil pengujian SEM dan XRD menunjukkan bahwa dengan peningkatan konsentrasi NaOH dan persentase kaolin 0% menghasilkan pori-pori yang sangat kecil dan matriks geopolimer yang lebih padat (C-S-H) dengan dihasilkannya struktur geopolimer yang lebih amorf, akan tetapi dengan adanya peningkatan persentase kaolin menghasilkan pori-pori yang semakin besar dan matriks geopolimer yang kurang padat (C-H) dengan dihasilkannya struktur geopolimer yang kurang amorf. Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa campuran persentase kaolin 0% menghasilkan mikrostruktur beton ringan geopolimer yang jauh lebih baik.

Kata Kunci : Beton Ringan Geopolimer; Mikrostruktur; SEM; XRD

ABSTRACT

Geopolymer lightweight concrete is an environmentally friendly concrete because the manufacturing process utilizes natural precursors and/or wastes such as kaolin, fly ash, and other pozzolans. This geopolymer lightweight concrete is also an innovative type of concrete that combines the advantages of lightweight concrete and geopolymer concrete. This study used materials consisting of precursors, alkaline activator solution, fine aggregate, superplasticizer, and foam with a target density of concrete $\leq 1500 \text{ kg/m}^3$. The precursors consisted of kaolin and fly ash with kaolin percentages of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by weight of fly ash. The ratio of Na_2SiO_3 and NaOH solution was 2.5:1 with NaOH concentrations of 12 M and 14 M. The ratio of alkaline activator solution and precursors was 0.5. The ratio of fine aggregate and precursors was 2. To produce foam, the ratio of foaming agent and water was 1:40 with a foam percentage of 50% by mixed volume. The curing of the test object was carried out for 24 hours at an oven temperature of 60°C . The results of the concrete compressive strength test showed that the GLC-0%-14M mixture produced the most optimum compressive strength of 19.20 MPa with a concrete density of 1481.12 kg/m^3 . The results of the SEM and XRD tests showed that an increase in the NaOH concentration and 0% kaolin percentage resulted in very small pores and a denser geopolymer matrix (C-S-H) resulting in a more amorphous geopolymer structure, but with an increase in the kaolin percentage produced larger pores and a less dense geopolymer matrix (C-H) resulting in a less amorphous geopolymer structure. Based on this research, it could be concluded that the 0% kaolin percentage mixture produced a much better geopolymer lightweight concrete microstructure.

Keywords : Geopolymer Lightweight Concrete; Microstructure; SEM; XRD

PENDAHULUAN

Beton ringan adalah beton yang mempunyai nilai berat jenis (*density*) di antara 300-1850 kg/m³ lebih rendah dari beton normal 2200-2600 kg/m³. Dalam SNI 2847:2013, kategori beton ringan (*lightweight concrete*) merupakan beton dengan agregat dan berat volume yang setimbang (*equilibrium density*), yaitu 1140-1840 kg/m³ (ASTM C567). Dan untuk mendapatkan berat isi beton yang ringan, salah satu metodenya dengan dengan melakukan standarisasi yang sesuai, dimana agregat ringan berfungsi sebagai agregat kasar pada beton (Firda, et al, 2021). Penerapan beton ringan berdasarkan nilai berat jenisnya dibagi dalam tiga kategori; untuk nilai berat jenis di antara 300-800 kg/m³ biasanya digunakan untuk non-struktural yang memiliki kuat tekan di bawah 7 MPa, untuk nilai berat jenis di antara 800-1350 kg/m³ biasanya digunakan untuk isolasi termal yang memiliki kuat tekan di antara 7-17 MPa, dan untuk nilai berat jenis di antara 1350-1900 kg/m³ biasanya digunakan untuk struktural yang memiliki kuat tekan di atas 17 MPa (Neville, 2011). Beton ringan sudah banyak diterapkan di Indonesia pada saat ini khususnya di daerah rawan gempa karena beton ringan memiliki keunggulan dapat mereduksi berat sendiri struktur menjadi lebih ringan. Salah satu jenis beton ringan yang paling banyak diaplikasikan adalah *foamed concrete*. Namun, proses pembuatan *foamed concrete* saat ini masih menggunakan semen portland sebagai bahan pengikatnya, sehingga pemakaian semen portland dapat diminimalisir dengan prekursor yang lebih ramah lingkungan seperti abu terbang, kaolin, dan prekursor lainnya yang bersifat pozzolan dengan memanfaatkan reaksi geopolimerisasi atau disebut beton geopolimer (Sutama *et al.*, 2019). Turner & Collins dalam Setiawati, et al (2022) menyebutkan bahwa beton geopolimer adalah beton yang dibuat tanpa semen tetapi menggunakan silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) dengan alkali aktivator yang berfungsi sebagai bahan pengikat. Bahan pengikat beton geopolimer terdiri dari dua komponen yaitu prekursor yang bersifat pozzolan (komponen *solid*) dan larutan alkali aktivator (komponen *liquid*). Pada saat dua komponen tersebut dicampur, maka terjadilah proses pengerasan yang diakibatkan oleh terbentuknya berbagai macam *aluminosilicate network* antara *amorphous* dan *crystalline*. Pemakaian campuran larutan sodium (NaOH dan Na₂SiO₃) sebagai larutan alkali aktivator akan menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi daripada larutan potassium (KOH dan K₂SiO₃) (Sumajouw and Dapas, 2013).

Studi mikrostruktur mortar berbasis abu terbang (Demir *et al.*, 2018). Abu terbang digunakan sebagai bahan substitusi terhadap berat semen dengan persentase 5% dan 20%. Hasil pengujian mikrostruktur menunjukkan bahwa setiap sampel mortar terbentuknya gel C-S-H yang berdampak positif pada kenaikan kuat tekan, matriks menjadi lebih padat, dan sedikit terbentuknya rongga. Selain itu, pada sampel mortar terlihat juga *ettringite* yang berdampak negatif pada ketahanan mortar terhadap serangan sulfat (Demir *et al.*, 2018).

Studi mikrostruktur beton geopolimer dengan jenis material yang berbeda (Bakri *et al.*, 2013). Material yang digunakan pada penelitian ini adalah abu terbang kelas F dan kaolin dengan rasio abu terbang terhadap larutan alkali aktivator 2,5 dan rasio kaolin terhadap larutan alkali aktivator 1,0. Hasil pengujian mikrostruktur menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis abu terbang menghasilkan matriks yang lebih padat, sedikit rongga, dan *microcracks* yang disebabkan oleh penguapan larutan alkali aktivator saat

proses *curing* pada suhu oven 70°C selama 24 jam. Namun, pada beton geopolimer berbasis kaolin menghasilkan matriks yang kurang padat, banyak terdapat rongga, dan partikel kaolin yang tidak bereaksi. Hal ini tentunya berpengaruh terhadap hasil uji kuat tekan beton yaitu beton geopolimer berbasis abu terbang memiliki kuat tekan yang lebih tinggi daripada kaolin (Bakri *et al.*, 2013).

Sifat dan karakteristik mikrostruktur beton geopolimer berbasis abu terbang dan kaolin (Bakri *et al.*, 2011). Persentase kaolin yang digunakan sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dari berat abu terbang. Hasil pengujian mikrostruktur menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan persentase kaolin, maka ikatan yang terjadi kurang amorf. Hal ini disebabkan oleh senyawa kristal yang terbentuk lebih banyak dan intensitas puncak yang dihasilkan lebih tinggi, sehingga berpengaruh pada penurunan kuat tekan beton (Bakri *et al.*, 2011).

Sifat mikrostruktur beton ringan geopolimer berbasis abu terbang dengan teknologi *foaming agent* (Abdullah *et al.*, 2012). Rasio abu terbang dan larutan alkali aktivator yang digunakan 2:1. Untuk memproduksi *foam*, rasio *foaming agent* dan air 1:20 dengan rasio pasta geopolimer dan *foam* 0,5 dari volume campuran. Hasil pengujian kuat tekan beton menunjukkan bahwa sampel LW2 yang di *curing* pada suhu oven 60°C menghasilkan kuat tekan optimum sebesar 11 MPa, 17,6 MPa, dan 18,2 MPa pada umur 1 hari, 7 hari, dan 28 hari dengan berat jenis 1667 kg/m³. Hasil pengujian mikrostruktur menunjukkan bahwa sampel LW2 memiliki matriks yang lebih padat. Hal ini disebabkan oleh proses *curing* panas dapat meningkatkan reaksi geopolimerisasi antara abu terbang dan larutan alkali aktivator untuk membentuk gel aluminosilikat. Pada sampel LW2 juga terlihat pori-pori yang berasal dari penggunaan *foam* (Abdullah *et al.*, 2012).

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari mikrostruktur beton ringan geopolimer dengan mengombinasikan material pembentuk beton ringan dan beton geopolimer melalui pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD).

METODE PENELITIAN

Material

Penelitian ini menggunakan material yang terdiri dari prekursor, larutan alkali aktivator, agregat halus, *superplasticizer*, dan *foam*. Prekursor yang digunakan terdiri dari kaolin dan abu terbang. Sebelum digunakan dalam campuran beton, abu terbang harus diayak terlebih dahulu menggunakan saringan No. 200, sedangkan untuk kaolin tidak diayak dengan saringan No. 200 karena ukuran partikelnya sudah mencapai 45 µm (lolos saringan 325 mesh). Komposisi kimia kaolin dan abu terbang dari hasil pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Mikrostruktur kaolin dan abu terbang dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Pola *X-Ray Diffraction* (XRD) kaolin dan abu terbang dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.

Tabel 1. Komposisi Kimia Kaolin

No.	Komposisi Kimia	Hasil (%)	ASTM C 618 Kelas N (%)	
1.	SiO ₂	48,73	Minimal (1+2+3)	70
2.	Al ₂ O ₃	34,49		
3.	Fe ₂ O ₃	1,05		
4.	SO ₃	0,0126	Maksimal	4
5.	CaO	0,0395		-
6.	MgO	0,207		-
7.	Na ₂ O	0,0285		-
8.	K ₂ O	1,61		-
9.	TiO ₂	0,504		-
10.	LOI	13,17	Maksimal	10

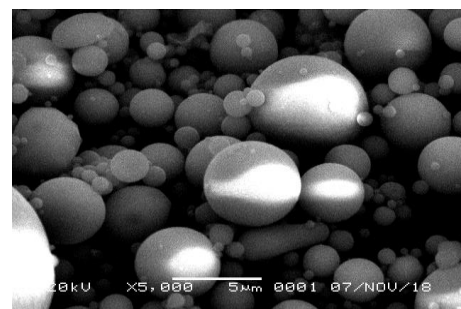
Tabel 2. Komposisi Kimia Abu Terbang

No.	Komposisi Kimia	Hasil (%)	ASTM C 618 Kelas F (%)	
1.	SiO ₂	50,07	Minimal (1+2+3)	70
2.	Al ₂ O ₃	30,41		
3.	Fe ₂ O ₃	4,28		
4.	SO ₃	0,348	Maksimal	5
5.	CaO	4,12		-
6.	MgO	2,41		-
7.	Na ₂ O	4,88		-
8.	K ₂ O	0,778		-
9.	TiO ₂	0,811		-
10.	LOI	1,28	Maksimal	6

Hasil pengujian XRF pada Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan bahwa kandungan silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) pada kaolin dan abu terbang cukup tinggi, sehingga kedua prekursor tersebut dapat digunakan untuk proses geopolimerisasi. Kaolin dan abu terbang yang digunakan termasuk kelas N dan kelas F sesuai persyaratan ASTM C 618 tentang spesifikasi abu terbang dan pozzolan alam lainnya baik mentah ataupun dikalsinasi yang cocok digunakan dalam beton (ASTM C 618, 2012).

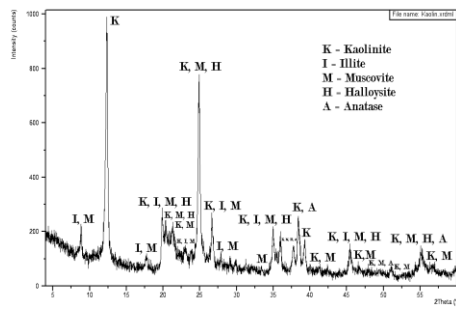


Gambar 1. Mikrostruktur Kaolin

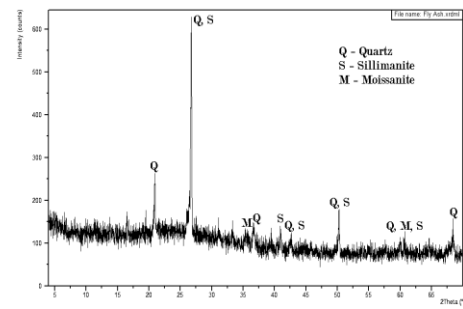


Gambar 2. Mikrostruktur Abu Terbang

Hasil pengujian SEM pada Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa partikel kaolin dengan perbesaran 5000x berbentuk heksagonal dimana bentuknya ini seperti sistem kristal heksagonal, sedangkan partikel abu terbang dengan perbesaran 5000x berbentuk bulat (*spherical shape*) yang memiliki diameter bervariasi.



Gambar 3. Pola XRD Kaolin

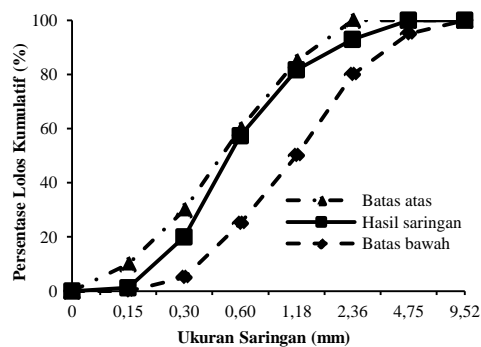


Gambar 4. Pola XRD Abu Terbang

Hasil pengujian XRD pada Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa komposisi mineral yang terdapat pada kaolin berupa *kaolinite* ($Al_2H_4O_9Si_2$), *muscovite* ($Al_3H_2KO_{12}Si_3$), *illite* ($Al_3H_2KO_{12}Si_3$), *anatase* (TiO_2), dan *halloysite* ($Al_2H_4O_9Si_2$), sedangkan komposisi mineral abu terbang berupa *quartz* (SiO_2), *moissanite* (SiC), dan *sillimanite* (Al_2O_5Si). Komposisi mineral tersebut menunjukkan senyawa kristal yang terdapat pada kaolin dan abu terbang. Senyawa kristal yang terkandung dalam kaolin lebih banyak tepatnya pada posisi $2\theta = 9^\circ, 12^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 21^\circ, 23^\circ, 24^\circ, 25^\circ, 27^\circ, 28^\circ, 30^\circ, 33^\circ, 35^\circ, 36^\circ, 38^\circ, 39^\circ, 41^\circ, 42^\circ, 45^\circ, 47^\circ, 48^\circ, 51^\circ, 55^\circ,$ dan 57° , sedangkan abu terbang lebih sedikit tepatnya pada posisi $2\theta = 21^\circ, 27^\circ, 36^\circ, 37^\circ, 41^\circ, 43^\circ, 50^\circ, 60^\circ,$ dan 68° . Oleh sebab itu, untuk mereaktifkan senyawa kristal yang terdapat pada kedua prekursor terutama kaolin, maka penggunaan variasi konsentrasi NaOH menjadi peranan penting dalam produksi material geopolimer karena kelarutan aluminosilikat dalam larutan alkali aktivator sangat bergantung pada konsentrasi hidroksida (Ibrahim *et al.*, 2017).

Larutan alkali aktivator yang digunakan pada penelitian ini adalah kombinasi larutan sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3). Sodium hidroksida (NaOH) yang dipakai berbentuk *flake* dengan kemurnian 98%. Larutan NaOH harus disiapkan satu hari sebelumnya dengan cara melarutkan konsentrasi NaOH 12 M sebanyak 480 gram dan NaOH 14 M sebanyak 560 gram ke dalam aquadest hingga volume larutan mencapai 1 liter. Larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) yang dipakai berbentuk cairan kental dan berwarna putih bening.

Agregat halus yang dipakai berasal dari pasir sungai dan sudah dilakukan pengujian sebelumnya dengan tujuan untuk memenuhi persyaratan campuran beton. Adapun hasil pengujian agregat halus dapat dilihat pada Gambar 5 dan Tabel 3.



Gambar 5. Kurva Gradasi Agregat Halus

Tabel 3. Hasil Pengujian Agregat Halus

No.	Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1.	Modulus Halus Butir	2,3-3,1	2,467
2.	Berat Jenis Curah	-	2,594
3.	Berat Jenis Jenuh Kering Muka	-	2,604
4.	Berat Jenis Semu	-	2,621
5.	Penyerapan Air (%)	Maksimal 3%	0,402
6.	Berat Isi Padat (gr/cm ³)	-	1,471
7.	Berat Isi Gembur (gr/cm ³)	-	1,359
8.	Kandungan Zat Organik	Maksimal No. 3	No. 2
9.	Kadar Lumpur (%)	Maksimal 5%	2,5
10.	Kadar Air (%)	-	6,045

Agregat halus terlebih dahulu diayak menggunakan saringan No. 16 (Onprom, Chaimoon and Cheerarot, 2015) dan dibuat dalam kondisi kering permukaan jenuh (SSD) untuk meminimalisir terjadinya penyerapan larutan alkali aktivator. Hasil pengujian agregat halus pada Gambar 5 menunjukkan bahwa agregat halus yang dipakai termasuk agak kasar dan Tabel 3 menunjukkan bahwa agregat halus masih memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan, sehingga agregat halus tersebut layak digunakan dalam campuran beton. *Superplasticizer* yang digunakan juga termasuk tipe F yang berfungsi untuk meningkatkan *workability* pada beton segar geopolimer. *Foaming agent* yang digunakan termasuk jenis surfaktan sintesis yang berbentuk seperti gel dan berwarna putih.

Desain Campuran dan Proses Pencampuran

Desain campuran (*mix design*) yang digunakan pada penelitian ini bersumber dari penelitian sebelumnya dengan mengembangkan hasil komposisi campuran yang dapat dilihat pada Tabel 4. Penelitian ini menggunakan material yang terdiri dari prekursor, larutan alkali aktivator, agregat halus, *superplasticizer*, dan *foam* dengan target berat jenis beton $\leq 1500 \text{ kg/m}^3$. Prekursor terdiri dari kaolin dan abu terbang dengan persentase kaolin 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat abu terbang. Perbandingan larutan Na_2SiO_3 dan NaOH 2,5:1 dengan konsentrasi NaOH 12 M dan 14 M. Perbandingan larutan alkali aktivator dan prekursor sebesar 0,5. Perbandingan agregat halus dan prekursor sebesar 2. Dosis *superplasticizer* yang digunakan sebesar 3% dari berat prekursor. Untuk memproduksi *foam* digunakan perbandingan *foaming agent* dan air 1:40 dengan presentase *foam* 50% dari volume campuran. Perawatan benda uji dilakukan selama 24 jam pada suhu oven 60°C.

Tabel 4. Desain Campuran Beton Ringan Geopolimer

Kode Campuran	Kaolin (gr)	Abu Terbang (gr)	Larutan Na_2SiO_3 (gr)	Larutan NaOH (gr)	Agregat Halus (gr)	Sp. (gr)	Foam (mL)
BRG-0%-12 M	0	435	155	62	869	13	679
BRG-0%-14 M	0	435	155	62	869	13	679
BRG-5%-12 M	22	413	155	62	869	13	679
BRG-5%-14 M	22	413	155	62	869	13	679
BRG-10%-12 M	43	391	155	62	869	13	679
BRG-10%-14 M	43	391	155	62	869	13	679
BRG-15%-12 M	65	369	155	62	869	13	679

BRG-15%-14 M	65	369	155	62	869	13	679
BRG-20%-12 M	87	348	155	62	869	13	679
BRG-20%-14 M	87	348	155	62	869	13	679

Keterangan: BRG adalah beton ringan geopolimer; 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% adalah persentase kaolin dari berat abu terbang; 12 M dan 14 M adalah konsentrasi NaOH; *Sp.* adalah *superplasticizer*

Proses pencampuran dimulai dengan menimbang masing-masing material yang bersifat *solid* dan *liquid* seperti pada Tabel 4. Setelah itu, menambahkan larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) ke dalam larutan sodium hidroksida (NaOH), diaduk dan didiamkan sampai dingin. Material *solid* seperti kaolin, abu terbang, dan agregat halus dimasukkan ke dalam mangkuk *mixer* dan diaduk sampai tercampur rata selama kurang lebih 5 menit. Kemudian, tambahkan larutan alkali aktivator yang sudah dingin ke dalam material *solid* sambil diaduk sampai tercampur rata dan tambahkan *superplasticizer*, proses ini membutuhkan waktu kurang lebih 5 menit. Sebelum proses pencampuran material *liquid* di atas selesai, *foam* diproduksi melalui metode *pre-formed foaming* yaitu *foaming agent* sebanyak 25 mL dan air sebanyak 1000 mL yang sudah di *premix* dimasukkan ke dalam tabung *foam generator* dan diberi tekanan udara sebesar 0,5 MPa. Proses pembuatan *foam* membutuhkan waktu kurang lebih 2 menit. Setelah itu, *foam* yang sudah dihasilkan secepat mungkin dimasukkan ke dalam campuran adukan beton sesuai dengan volume yang diperlukan sembari diaduk selama 2 menit. Lalu, beton segar dituangkan ke dalam cetakan kubus bersisi 50x50x50 mm dan dilakukan *curing* selama 24 jam pada suhu oven 60°C yang permukaannya dilapisi *plastic wrap* untuk meminimalisir terjadinya penguapan larutan alkali aktivator.

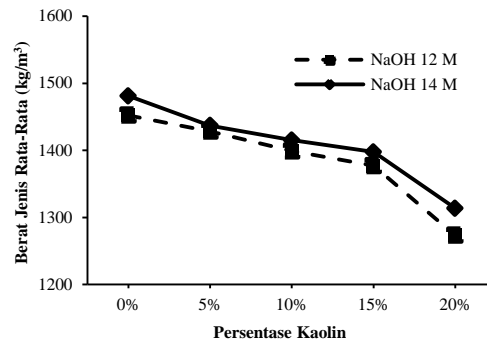
Pengujian

Pengujian yang pertama kali dilakukan adalah pengujian prekursor kaolin dan abu terbang di Laboratorium Pusat Survey Geologi Bandung yang terdiri dari pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Pembuatan benda uji dan pengujian beton keras dilakukan di Laboratorium PT. Semen Baturaja (Persero) Palembang. Pengujian beton keras meliputi pengujian berat jenis dan kuat tekan beton. Setiap komposisi campuran dibuat lima benda uji kubus dan dilakukan pengujian saat umur 28 hari. Sampel beton yang sudah dilakukan pengujian kuat tekan diambil untuk dilakukan pengujian mikrostruktur berupa sampel dengan nilai kuat tekan beton tertinggi berbentuk serpihan kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

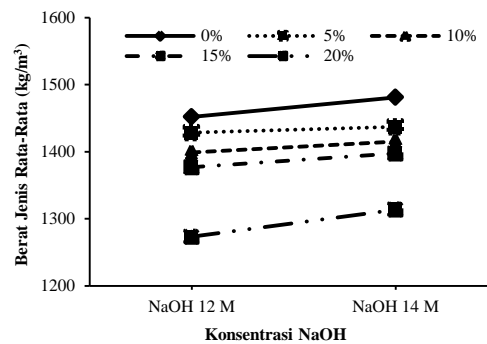
Hasil Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis beton dilakukan pada umur 28 hari dengan cara menimbang berat benda uji kubus bersisi 50x50x50 mm dibagi volume benda uji. Target berat jenis (*density*) beton yang ingin dicapai $\leq 1500 \text{ kg/m}^3$. Adapun hasil pengujian berat jenis beton dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Hasil Pengujian Berat Jenis Beton Berdasarkan Persentase Kaolin

Gambar 6 menunjukkan bahwa semua komposisi campuran mencapai target berat jenis beton $\leq 1500 \text{ kg/m}^3$. Semakin meningkatnya persentase kaolin yang digunakan, maka berat jenis beton yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini terjadi karena partikel kaolin yang berbentuk heksagonal berkontribusi menghasilkan rongga yang semakin besar, sehingga beton yang terbentuk kurang padat. Perbedaan yang paling utama antara beton geopolimer berbasis kaolin dan abu terbang yaitu pori-pori yang dihasilkan pada beton geopolimer berbasis kaolin berkisar ukuran mesopori, sedangkan untuk pori-pori beton geopolimer berbasis abu terbang berkisar ukuran mikropori (Bakri *et al.*, 2013).

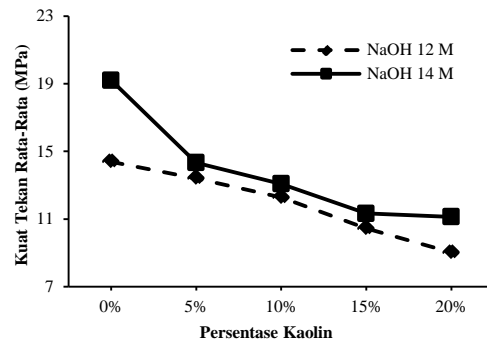


Gambar 7. Hasil Pengujian Berat Jenis Beton Berdasarkan Konsentrasi NaOH

Gambar 7 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH yang digunakan, maka berat jenis beton yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena konsentrasi NaOH yang lebih tinggi banyak melepaskan senyawa silika dan alumina, sehingga berdampak pada peningkatan reaksi geopolimerisasi (Ibrahim *et al.*, 2017).

Hasil Pengujian Kuat Tekan

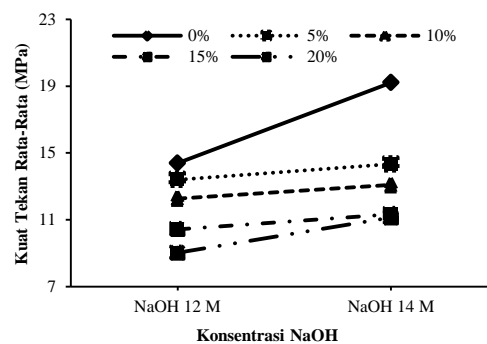
Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari dengan hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9. Hasil pengujian kuat tekan beton yang maksimum terdapat pada kode campuran BRG-0%-14M sebesar 19,20 MPa dengan berat jenis beton $1481,12 \text{ kg/m}^3$.



Gambar 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Berdasarkan Persentase Kaolin

Gambar 8 menunjukkan bahwa semakin meningkatnya persentase kaolin yang digunakan, maka kuat tekan beton yang dihasilkan semakin rendah. Hal ini terjadi karena kaolin membentuk rongga yang ukurannya besar baik pada permukaan dan isi sampel beton serta kontribusi kaolin yang termasuk jenis *clay* bersifat kohesif (Ibrahim *et al.*, 2017). Prekursor kaolin yang digunakan dalam campuran beton akan menghasilkan sifat fisik dan mekanik beton yang jauh lebih buruk dari abu terbang (Ghais *et al.*, 2014).

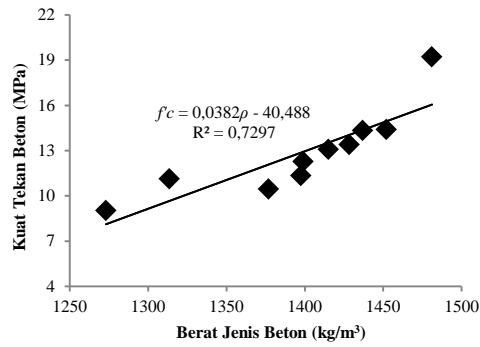
Penurunan kuat tekan beton ini juga dapat dipengaruhi oleh hasil pengujian XRF pada prekursor kaolin terutama *Loss on Ignition* (LOI) seperti yang terlihat pada Tabel 1. Hasil LOI yang didapatkan melebihi dari syarat dan ketentuan ASTM C 618 karena LOI menjadi faktor penting dalam menentukan senyawa karbon yang belum terbakar dan akan membuat kebutuhan larutan alkali aktivator semakin banyak, sehingga terjadi penurunan pada kuat tekan beton (Diaz, Allouche and Eklund, 2010).



Gambar 9. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Berdasarkan Konsentrasi NaOH

Gambar 9 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH yang digunakan, maka kuat tekan beton yang dihasilkan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena kereaktifan kimia dari unsur silika dan alumina yang terdapat pada masing-masing prekursor dan juga karena alkalinitas yang tinggi dari peningkatan konsentrasi NaOH. Semakin meningkatnya konsentrasi alkali yang digunakan, maka dapat meningkatkan proses geopolimerisasi yang mengakibatkan naiknya kuat tekan beton (Ibrahim *et al.*, 2017).

Hasil pengujian kuat tekan beton yang dihasilkan berbanding lurus dengan hasil pengujian berat jenis beton, sehingga kedua hasil pengujian tersebut dapat dihubungkan dengan persamaan regresi linier yang dapat dilihat pada Gambar 10.



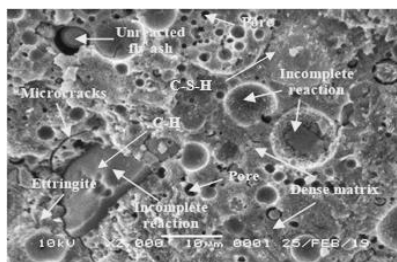
Gambar 10. Hubungan Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton

Gambar 10 menunjukkan bahwa semakin tinggi berat jenis beton, maka semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan. Dari hasil regresi linier diperoleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang semakin mendekati angka 1. Hal ini membuktikan bahwa nilai berat jenis dan kuat tekan beton proporsional.

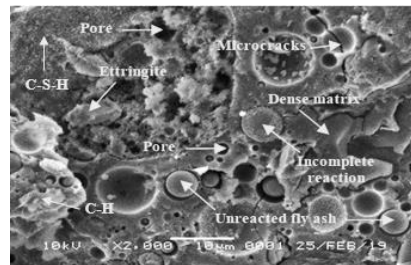
Hasil Pengujian Mikrostruktur

Hasil pengujian mikrostruktur didapatkan dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) pada setiap komposisi campuran beton ringan geopolimer. Untuk hasil pengujian SEM dengan perbesaran 2000x dapat dilihat pada Gambar 11 sampai dengan Gambar 20 dan hasil pengujian XRD dapat dilihat pada Gambar 21 sampai dengan Gambar 30.

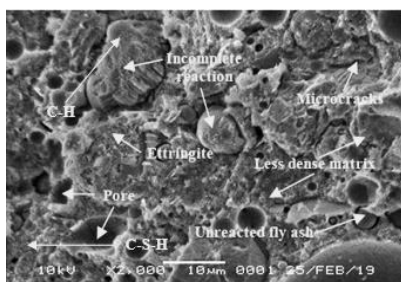
Hasil pengujian SEM secara umum masih terdapat bentuk partikel kaolin dan abu terbang yang belum bereaksi secara sempurna, ukuran pori-pori yang dihasilkan bervariasi, dan lebar *microcracks* yang diukur bervariasi. Jika setiap campuran tersebut memiliki ukuran pori-pori dan lebar *microcracks* semakin besar, maka berat jenis dan kuat tekan yang dihasilkan semakin rendah (Abdullah *et al.*, 2012). Adapun ukuran pori-pori dan lebar *microcracks* yang diperoleh dari program *ImageJ* dapat dilihat pada Tabel 5.



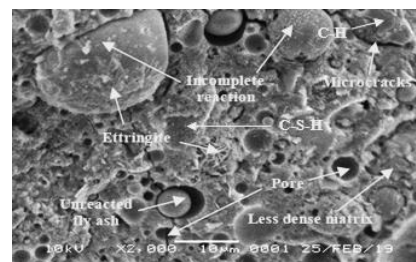
Gambar 11. Hasil Pengujian SEM BRG-0%-12M



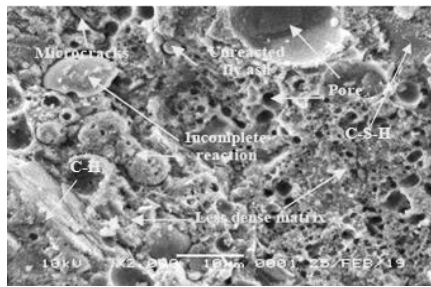
Gambar 12. Hasil Pengujian SEM BRG-0%-14M



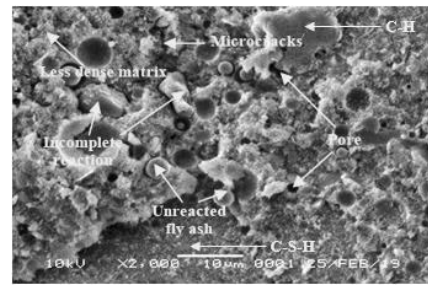
Gambar 13. Hasil Pengujian SEM BRG-5%-12M



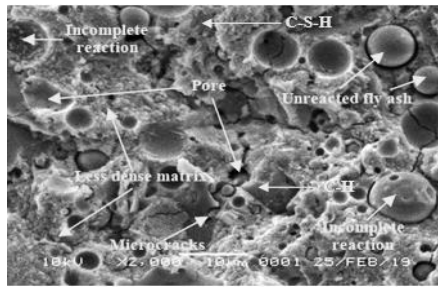
Gambar 14. Hasil Pengujian SEM BRG-5%-14M



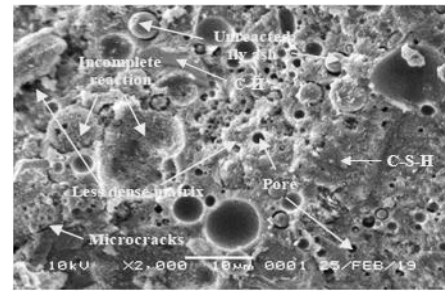
Gambar 15. Hasil Pengujian SEM BRG-10%-12M



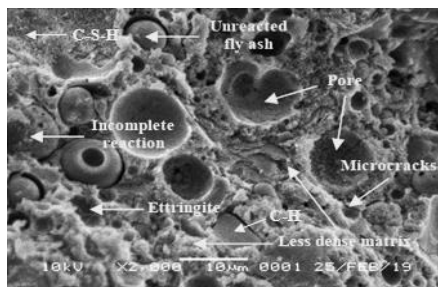
Gambar 16. Hasil Pengujian SEM BRG-10%-14M



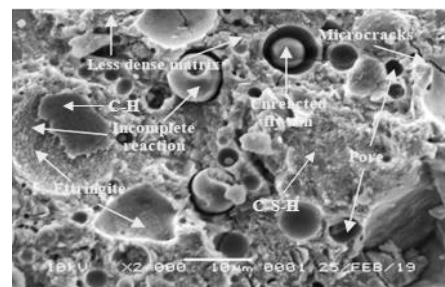
Gambar 17. Hasil Pengujian SEM BRG-15%-12M



Gambar 18. Hasil Pengujian SEM BRG-15%-14M



Gambar 19. Hasil Pengujian SEM BRG-20%-12M



Gambar 20. Hasil Pengujian SEM BRG-20%-14M

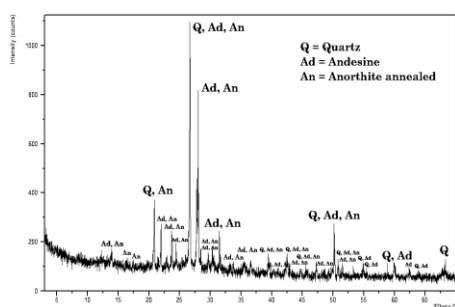
Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan bahwa campuran persentase kaolin 0% dan peningkatan konsentrasi NaOH menghasilkan pori-pori dan *microcracks* yang semakin kecil dengan ukuran seperti pada Tabel 5, sehingga berat jenis dan kuat tekan beton yang dihasilkan semakin tinggi. Pada campuran ini terlihat partikel *ettringite* berbentuk jarum yang terjadi akibat endapan alkali yang tidak bereaksi secara sempurna dengan prekursor (Mahmoud, Khoshnaw and Mahmood, 2017) dan juga terlihat *incomplete reaction* yang terjadi akibat permukaan abu terbang diselubungi oleh gel aluminosilikat (Abdullah *et al.*, 2012). Selain itu, dengan peningkatan konsentrasi NaOH membentuk matriks geopolimer yang semakin padat (C-S-H) dari hasil *complete reaction* antara abu terbang dan larutan alkali aktivator, sehingga berat jenis dan kuat tekan beton yang dihasilkan lebih besar (Ibrahim *et al.*, 2017).

Tabel 5. Ukuran Pori-Pori dan Lebar *Microcracks*

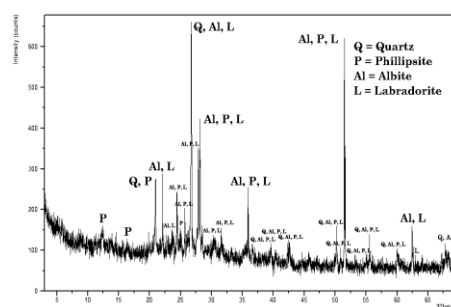
Kode Campuran	Pori-Pori (µm)	<i>Microcracks</i> (µm)
BRG-0%-12 M	0,3-5,4	0,1-0,5
BRG-0%-14 M	0,2-5,4	0,1-0,4
BRG-5%-12 M	0,4-7,8	0,1-0,6
BRG-5%-14 M	0,3-7,7	0,1-0,5
BRG-10%-12 M	0,5-10,8	0,1-0,7
BRG-10%-14 M	0,4-9,3	0,1-0,65
BRG-15%-12 M	0,5-12,2	0,1-0,75
BRG-15%-14 M	0,5-11,5	0,1-0,75
BRG-20%-12 M	0,5-16	0,1-1,55
BRG-20%-14 M	0,5-12,4	0,1-0,8

Gambar 13 sampai dengan Gambar 20 menunjukkan bahwa campuran dengan peningkatan persentase kaolin menghasilkan pori-pori dan *microcracks* yang semakin besar seperti pada Tabel 5, sehingga berat jenis dan kuat tekan beton yang dihasilkan semakin rendah. Pada campuran ini terlihat partikel *ettringite* dan *incomplete reaction* yang semakin banyak, sehingga menghasilkan matriks geopolimer yang kurang padat atau gembur (C-H) dan ikatan geopolimerisasi yang terjadi semakin lemah (Sutama *et al.*, 2019). Hasil pengujian XRD secara umum terdiri dari *quartz* (SiO₂) sebagai mineral utama, *gismondine* (Al₂CaH₈O₁₂Si₂), *albite* (Al_{1,2}Ca_{0,2}Na_{0,8}O₈Si_{2,8}), *andesine* (Al_{1,488}Ca_{0,491}Na_{0,499}O₈Si_{2,506}), *labradorite* (Al_{1,62}Ca_{0,65}Na_{0,32}O₈Si_{2,38}), *anorthite Na* (Al₂CaO₈Si₂), *anorthite annealed* (Al₂CaO₈Si₂), *phillipsite* (H_{8,78}N_{1,01}Na_{0,1}O_{10,37}Si₄), *albite Ca ordered* (Al_{1,2}Ca_{0,2}Na_{0,8}O₈Si_{2,8}), *anorthite ordered* (Al₂CaO₈Si₂), *anorthite Na* (Al_{1,84}Ca_{0,86}Na_{0,14}O₈Si_{2,16}), *labradorite* (Al_{1,63}Ca_{0,64}Na_{0,35}O₈Si_{2,37}), *albite disordered* (AlNaO₈Si₃), dan *albite Ca low* (Al_{1,16}Ca_{0,16}Na_{0,84}O₈Si_{2,84}). Mineral-mineral di atas menunjukkan fase kristal yang terdapat pada setiap komposisi campuran dimana fase kristal paling dominan berada pada campuran dengan persentase kaolin 5% -20%.

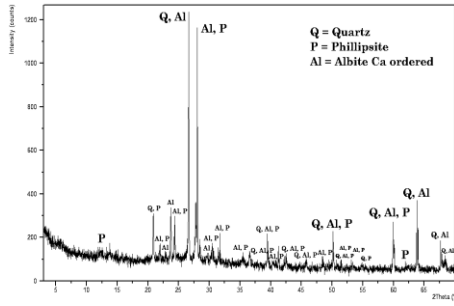
Gambar 21 dan Gambar 22 menunjukkan bahwa campuran persentase kaolin 0% dan peningkatan konsentrasi NaOH membentuk struktur geopolimer yang lebih amorf dengan puncak intensitas yang dihasilkan lebih rendah dan luasan fase kristal kurang dominan seperti pada Tabel 6 dan Tabel 7, sehingga kuat tekan beton mengalami peningkatan. Konsentrasi NaOH memiliki peranan penting untuk meningkatkan reaksi geopolimerisasi pada prekursor abu terbang, sehingga terbentuk gel C-S-H yang lebih padat dengan puncak kristal lebih rendah (Ramalingam *et al.*, 2022).



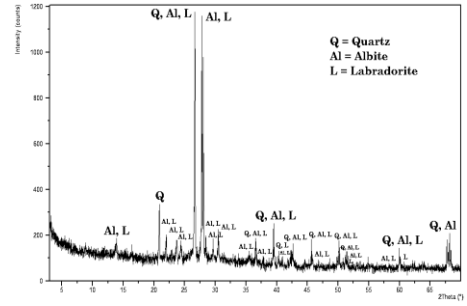
Gambar 21. Hasil Pengujian XRD
BRG-0% -12M



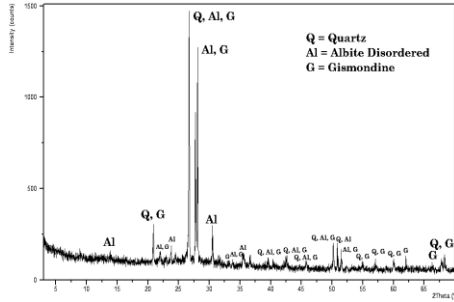
Gambar 22. Hasil Pengujian XRD
BRG-0% -14M



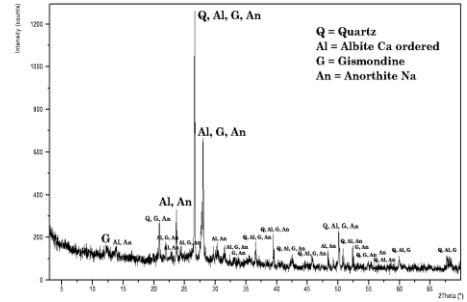
Gambar 23. Hasil Pengujian XRD BRG-5% -12M



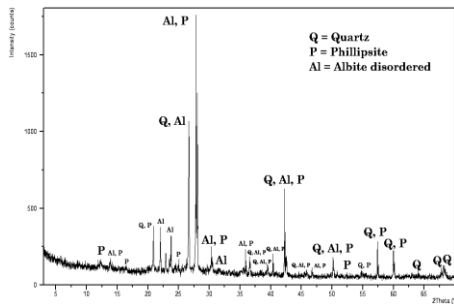
Gambar 24. Hasil Pengujian XRD BRG-5% -14M



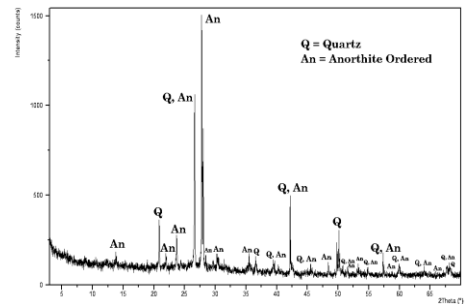
Gambar 25. Hasil Pengujian XRD BRG-10% -12M



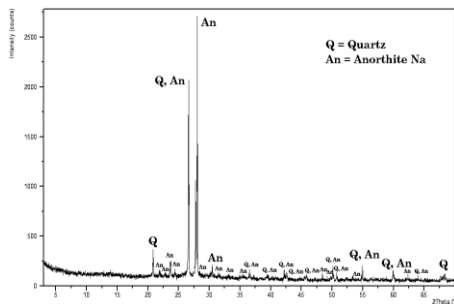
Gambar 26. Hasil Pengujian XRD BRG-10% -14M



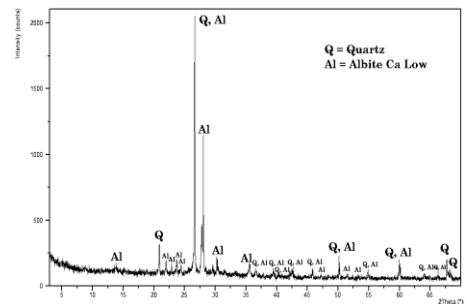
Gambar 27. Hasil Pengujian XRD BRG-15% -12M



Gambar 28. Hasil Pengujian XRD BRG-15% -14M



Gambar 29. Hasil Pengujian XRD BRG-20% -12M



Gambar 30. Hasil Pengujian XRD BRG-20% -14M

Tabel 6. Puncak Intensitas Tertinggi Fase Kristal

Kode Campuran	Puncak Intensitas (<i>counts</i>)
BRG-0%-12 M	1068
BRG-0%-14 M	650
BRG-5%-12 M	1224
BRG-5%-14 M	1173
BRG-10%-12 M	1447
BRG-10%-14 M	1238
BRG-15%-12 M	1624
BRG-15%-14 M	1493
BRG-20%-12 M	2527
BRG-20%-14 M	2052

Gambar 23 sampai dengan Gambar 30 menunjukkan bahwa campuran dengan peningkatan persentase kaolin membentuk struktur geopolimer yang kurang amorf dengan puncak intensitas yang dihasilkan lebih tinggi seperti pada Tabel 6, sehingga kuat tekan beton mengalami penurunan. Hal ini terjadi karena prekursor kaolin menghasilkan fase kristal yang lebih dominan dari prekursor abu terbang, sehingga luasan fase kristal yang diperoleh lebih besar seperti pada Tabel 7.

Tabel 7. Luasan Fase Kristal dan Amorf

Kode Campuran	Kristal (%)	Amorf (%)
BRG-0%-12 M	9,1	90,9
BRG-0%-14 M	8,7	91,3
BRG-5%-12 M	11,8	88,2
BRG-5%-14 M	10,6	89,4
BRG-10%-12 M	12,1	87,9
BRG-10%-14 M	11,3	88,7
BRG-15%-12 M	13,4	86,6
BRG-15%-14 M	12,2	87,8
BRG-20%-12 M	14,4	85,6
BRG-20%-14 M	13,1	86,9

Penggunaan agregat halus juga dapat menurunkan kuat tekan beton karena agregat halus mengandung beragam mineral aluminosilikat yang berkontribusi membentuk fase kristal, sehingga tidak semua fase kristal ini dapat bereaksi secara sempurna kecuali material yang bersifat amorf.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah komposisi campuran maksimum terdapat pada campuran BRG-0%-14M dengan nilai kuat tekan beton sebesar 19,20 MPa dan berat jenis beton sebesar 1481,12 kg/m³. Semakin meningkatnya persentase kaolin yang digunakan, maka kuat tekan dan berat jenis beton mengalami penurunan. Sebaliknya semakin meningkatnya konsentrasi NaOH, maka kuat tekan dan berat jenis beton mengalami peningkatan. Penerapan hasil penelitian ini lebih baik digunakan untuk non-struktural. Hasil pengujian mikrostruktur menunjukkan bahwa campuran dengan persentase kaolin 0% dan peningkatan konsentrasi NaOH menghasilkan

pori-pori dan *microcracks* yang semakin kecil, sehingga terbentuk matriks geopolimer yang semakin padat (C-S-H) dan lebih amorf dengan puncak intensitas yang dihasilkan lebih rendah dan luasan fase kristal kurang dominan. Sebaliknya campuran dengan peningkatan persentase kaolin menghasilkan pori-pori dan *microcracks* yang semakin besar, sehingga terbentuk matriks geopolimer yang gembur (C-H) dan kurang amorf dengan puncak intensitas yang dihasilkan lebih tinggi dan luasan fase kristal lebih dominan. Hasil pengujian mikrostruktur dengan presentase kaolin 0% menunjukkan hasil yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M.M.A.B. *et al.* (2012) *Fly Ash-based Geopolymer Lightweight Concrete Using Foaming Agent*, International Journal of Molecular Sciences, 13, pp. 7186–7198. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms13067186>.
- ASTM C 618 (2012) *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken: ASTM International. Available at: <https://doi.org/10.1520/C0618-12a>.
- Bakri, A.M.M. Al *et al.* (2011) *Properties And Microstructural Characteristics Of Geopolymers Using Fly Ash With Different Percentages Of Kaolin At Room Temperature Curing*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(10), pp. 824–828.
- Bakri, A.M.M. Al *et al.* (2013) *Microstructure Studies on Different Types of Geopolymer Materials*, Applied Mechanics and Materials, 421, pp. 384–389. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.421.384>.
- Demir, I. *et al.* (2018) *Examination of Microstructure of Fly Ash in Cement Mortar*, International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering, 5(1), pp. 49–51. Available at: <http://iraj.in>.
- Diaz, E.I., Allouche, E.N. and Eklund, S. (2010) *Factors Affecting The Suitability of Fly Ash as Source Material For Geopolymers*, Fuel, 89(5), pp. 992–996. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.012>.
- Firda, A., Permatasari, R., & Fuad, I. S. (2021). *Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) Sebagai Material Pengganti Agregat Kasar Pada Pembuatan Beton Ringan*. Jurnal Deformasi, 6(1), 1-8.
- Ghais, A. *et al.* (2014) *Performance of Concrete with Fly Ash and Kaolin Inclusion*, International Journal of Geosciences, 05, pp. 1445–1450. Available at: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2014.512118>.
- Ibrahim, W.M.W. *et al.* (2017) *Effects of Sodium Hydroxide (NaOH) solution Concentration on Fly Ash-Based Lightweight Geopolymer*, AIP Conference Proceedings, 1885(020011), pp. 020011–1–020011–8. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5002205>.
- Mahmoud, A.S., Khoshnaw, G.J. and Mahmood, F.I. (2017) *Engineering and*

Microstructures Characteristics of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Eurasian Journal of Science & Engineering, 2(2), pp. 27–39. Available at: <https://doi.org/10.23918/eajse.v2i2p27>.

Neville, A.M. (2011) *Properties of Concrete*. 5th edn. England: Pearson Education Limited.

Onprom, P., Chaimoon, K. and Cheerarot, R. (2015) *Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam Contents*, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2015/381704>.

Ramalingam, M. *et al.* (2022) *Flexural Performance and Microstructural Studies of Trough-Shaped Geopolymer Ferrocement Panels*, *Materials*, 15(5477), pp. 1–19. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15165477>.

Setiawati, M., Martini, S., & Nurulita, R. (2022). *Variasi Molaritas Naoh Dan Alkali Aktivator Beton Geopolimer*. *Jurnal Deformasi*, 7(1), 56-64.

Sumajouw, M.D.J. and Dapas, S.O. (2013) *Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolymer*. Yogyakarta: Andi.

Sutama, A. *et al.* (2019) *Properties And Microstructural Characteristics Of Lightweight Geopolymer Concrete With Fly Ash And Kaolin*, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(07), pp. 57–64. Available at: <https://www.ijstr.org/paper-references.php?ref=IJSTR-0619-20484>.



Jurnal Deformasi is licensed under
a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)