

PEMBUATAN AGREGAT BETON GEOPOLIMER SEBAGAI *SELF HEALING* CONCRETE MENGGUNAKAN *BACILLUS SUBTILIS*

***Wa Nur Hasratia**
Universitas Negeri Makassar
nurhasratia@gmail.com

Subaer
Universitas Negeri Makassar
subaer@unm.ac.id

Husain
Universitas Negeri Makassar
husain.physics@unm.ac.id

*Penulis Korespondensi

Naskah diajukan
24 Desember 2022
Naskah direvisi
28 Desember 2022
Naskah disetujui
09 April 2023
Naskah dipublikasi
22 April 2023

Abstrak - Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mensintesis agregat beton geopolimer serta melihat pengaruh penambahan agregat dan bakteri *bacillus subtilis* terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash*. Agregat geopolimer diproduksi dengan bahan dasar *Fly Ash*, bakteri *bacillus subtilis*, NaOH (Natrium Hidroksida), Na₂SiO₃ (Sodium Silikat) dan H₂O (Aquadres), dituang ke dalam cetakan agregat dan dibiarkan pada suhu ruang. Agregat kemudian dicampur kedalam pasta geopolimer dan di *curing* pada suhu 70°C selama 1 jam. Sampel dibuat 4 komposisi dengan variasi penambahan agregat sebesar 0%; 8.3%; 13.8% dan 27.7%. Sampel disimpan pada ruang terbuka selama 28 hari. Sifat mekanik beton geopolimer dikarakterisasi melalui kuat tekan. Komposisi kimia dari beton geopolimer dikarakterisasi menggunakan XRD (*X-Ray Diffraction*). Mikrostruktur sampel beton geopolimer yang dihasilkan dipelajari dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Sifat fisik beton geopolimer dikarakterisasi menggunakan pengukuran massa jenis dan porositas. Hasil penelitian ini menawarkan wawasan baru tentang potensi sebagai salah satu alternatif pada proses pemulihan keretakan dengan *Self Healing Concrete*.

Kata Kunci : Beton Geopolimer, *Bacillus subtilis*, *Self Healing Concrete*.

Abstract – The main objective of this study was to synthesize geopolymer concrete aggregates and to see the effect of adding aggregate and *bacillus subtilis* bacteria on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete. Geopolymer aggregates are produced with the basic ingredients of Fly Ash, *bacillus subtilis* bacteria, NaOH (Sodium Hydroxide), Na₂SiO₃ (Sodium Silicate) and H₂O (Aquadres), poured into aggregate molds and left at room temperature. The aggregate was then mixed into the geopolymer paste and cured at 70°C for 1 hour. Samples were made of 4 compositions with variations in the addition of 0% aggregate; 8.3%; 13.8% and 27.7%. Samples were stored in open space for 28 days. The mechanical properties of geopolymer concrete are characterized by compressive strength. The chemical composition of geopolymer concrete was characterized using XRD (*X-Ray Diffraction*). The microstructure of the resulting geopolymer concrete samples was studied using SEM (*Scanning Electron Microscopy*). The physical properties of geopolymer concrete are characterized using density and porosity measurements. The results of this study offer new insights about the potential as an alternative in the crack recovery process with *Self Healing Concrete*.

Keywords : Geopolymer Concrete, *Bacillus subtilis*, *Self Healing Concrete*,

A. PENDAHULUAN

Geopolimer merupakan bahan atau material yang berupa anorganik yang disintesa melalui proses polimerisasi (Manuahe et al., 2014). Geopolimer adalah material pengikat alternatif sebagai pengganti semen. Pada geopolimer, larutan alkali digunakan untuk mengaktifkan mineral yang berasal dari tambang (*metakaolin*) atau produk samping industri (*fly ash*) yang mengandung silika (Si) dan alumina (Al) sehingga akan membentuk struktur polimer tiga dimensi. Proses geopolimerisasi meliputi reaksi kimia dalam kondisi basa pada mineral Al-Si, yang akan melepaskan ikatan Si-O-Al-O (Rizal et al., 2020). Salah satu limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan beton geopolimer adalah limbah abu terbang (*fly ash*). Proses pembuatan beton geopolimer membutuhkan alkali aktivator sebagai pereaksi kandungan Silika dan Alumina yang terkandung dalam *fly ash*, hal ini dikarenakan *fly ash* tidak memiliki sifat cementious (Ikomudin et al., n.d.). Berdasarkan ASTM C-618 2005, *fly ash* bersifat pozolanik yang membuat *fly ash* cocok digunakan sebagai alternatif pengganti semen ke dalam campuran beton ataupun mortar.

Geopolimer berbahan dasar *fly ash* berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan agregat buatan dan sebagai pengganti agregat alam. Agregat buatan dibuat dengan menggunakan geopolimerisasi *fly ash* dengan aktivator alkali. Kekuatan agregat geopolimer dapat dipengaruhi oleh rasio *fly ash* terhadap aktivator alkali (Karyawan et al., 2019). Beton geopolimer merupakan polimer anorganik dengan susunan atom Si dan Al sehingga memiliki kekuatan dan ketahanan yang sangat baik. Beton geopolimer lebih sering disebut dengan beton ramah lingkungan karena tidak menggunakan semen sebagai material pembentuk beton. Salah satu limbah yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan beton geopolimer adalah limbah abu terbang (*fly ash*).

Beton merupakan materi yang umum digunakan pada konstruksi bangunan dikarenakan kekuatan dan ketahanannya, serta rendah pembiayaan jika dibandingkan dengan material konstruksi lainnya. Namun karena beberapa faktor seperti kelebihan beban, reaksi alkali dengan agregat, susut, rangkai, dan perubahan volume akibat temperatur tinggi dapat menyebabkan keretakan internal atau keretakan pada permukaan beton (Herlambang, 2017). Keretakan yang timbul pada beton jika tidak ditangani akan menjadi jalan masuknya partikel-partikel yang dapat menyebabkan kerusakan seiring berjalannya waktu. Kecendrungan beton untuk retak dapat mempengaruhi kinerja pada beton. Menurut Tziviloglou et al., (2017), melaporkan bahwa keretakan yang timbul pada beton jika tidak ditangani akan menjadi jalan masuknya partikel-partikel yang dapat menyebabkan kerusakan seiring berjalannya waktu. Kecendrungan beton untuk retak dapat mempengaruhi kinerja pada beton. Jika terjadi secara terus menerus, tentunya akan mengurangi bahkan mereduksi kekuatan dari beton, serta dapat meningkatkan biaya perbaikan struktur yang menggunakan beton sebagai bahan konstruksinya.

Keretakan beton merupakan salah satu hal yang berpengaruh pada kegagalan struktural. Apabila keretakan beton meluas sampai tulangan maka akan menyebabkan terjadinya korosi (Afifah, 2017). Kualitas beton dari *fly ash* dapat ditingkatkan dengan penambahan bakteri yang juga mengurangi

permeabilitas dan porositas (Kumar Jogi & Vara Lakshmi, 2021). Oleh karena itu, diperlukan suatu bahan penyusun beton agar beton dapat meregenerasi atau menyembuhkan dirinya sendiri yang dinamakan/disebut *self healing concrete*. *Self healing concrete* adalah beton yang memanfaatkan mikoba pada komposisi campuran beton yang dapat membuat beton bersifat pulih mandiri dan memiliki umur pemakaian yang panjang. Penggunaan mikroba tersebut ditunjukkan untuk dapat menambah kuat tekan beton dengan cara menutup pori-pori yang ada didalam beton dengan zat kapur sehingga beton menjadi lebih kuat dan padat. Bakteri melepaskan oksigen dan menyerap karbon dioksida (Rizal et al., 2020).

B. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental murni dan bersifat laboratories yang mengarah pada pembuatan agregat beton geopolimer menggunakan bahan dasar *fly ash* dan bakteri dan di aktivasi melalu metode alkali sebagai penguat mekanik. Penelitian ini berlangsung mulai dari bulan Maret – Juni 2022.

Dalam penelitian ini dibuat empat sampel dengan memvariasikan konsentrasi penambahan agregat. Berikut komposisi bahan dasar yang digunakan:

Tabel 1. Komposisi Bahan Dasar yang Digunakan

Komposisi	<i>Fly ash</i> (g)	NaOH (gr)	Sodium Silikat (gr)	H ₂ O (gr)	Bakteri (gr)	Agregat (gr)
BG-A 0%	90	4	26,33	11,89	0	0
BG+B-A 8,3%					0,03	7,5
BG+B-A 13,8%					0,03	12,5
BG+B-A 27,7%					0,03	25

Proses pembuatan beton geopolimer diawali dengan bahan dasar *fly ash* yang tersedia dipanaskan untuk mengurangi kadar air dalam *fly ash*. Untuk agregat yang akan divariasikan, ditimbang dengan komposisi yang telah ditentukan. Sintesis agregat dilakukan dengan mencampurkan bahan dasar berupa *Fly Ash*, bakteri *bacillus subtilis*, Na₂O.3SiO₂ (*Sodium Silikat*) dan NaOH (*Natrium Hidroksida*) yang diaktivasi menggunakan H₂O (*Aquades*), dituang ke dalam cetakan agregat dan di simpan pada suhu ruang. Beton geopolimer disintesis dengan variasi agregat 0%, 8,3%, 13,8% dan 27,7%. Selanjutnya, agregat dicampur kedalam pasta geopolimer dan di-*curing* pada suhu 70°C selama 1 jam. Sampel disimpan pada ruang terbuka selama 28 hari.

Karakterisasi dan pengujian terhadap sampel beton geopolimer yang dilakukan yaitu : Karakterisasi sifat struktur (mikro dan kristal) menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Pengukuran massa jenis dan porositas dengan prinsip Archimedes. Untuk mengitung nilai massa jenis dan porositas sampel digunakan persamaan sebagai berikut:

$$D_b = \frac{m_d}{m_s - m_i} \times D_i \tag{1}$$

$$P_a = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_i} \times 100\% \tag{2}$$

D_b massa jenis, m_d massa geopolimer kering, m_i massa geopolimer jenuh air dan disuspensi di dalam air, m_s massa jenuh air dan disuspensi di udara, D_i massa jenis air pada temperatur kamar, dan P_a menyatakan porositas (Subaer, 2015).

Untuk menguji kekuatan mekanik sampel, dilakukan pengujian kuat tekan. Adapun persamaan yang digunakan sebagai berikut :

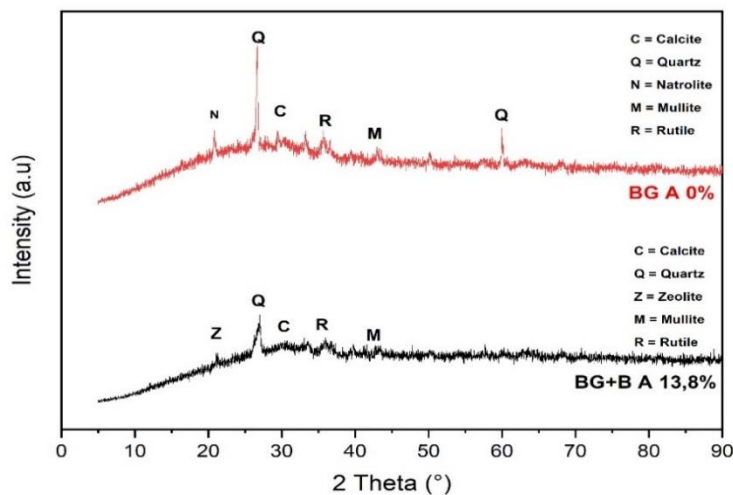
$$C = \frac{P}{A} \quad (3)$$

C = Kekuatan tekan (MPa), P = Beban total hingga sampel retak (N), dan A = Luas Permukaan sampel yang ditekan (mm²).

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi XRD bertujuan mengetahui struktur kristal dari bahan dasar yang telah disintesis. Struktur kristal diperoleh dengan menggunakan aplikasi PDXL2 dari mesin XRD Rigaku Miniflex terhadap sampel beton geopolimer diperoleh informasi adanya fase kristal yang ditandai dengan adanya puncak yang tajam.



Gambar 1. Difraktogram Beton Geopolimer dengan dan tanpa Agregat

Gambar 1 menunjukkan hasil analisis XRD beton geopolimer dengan penambahan agregat sebesar 0% dan 13,8%. Terdapat perbedaan yang tidak signifikan antara sampel yang ditambahkan dan tanpa agregat. Terlihat bahwa terbentuk pola kristal untuk setiap sampel dan terjadi pergeseran puncak sudut 2-theta yang tidak signifikan. Seiring dengan penambahan agregat terdapat fase Quartz, Calcite, Zeolite, Mullite dan Rutile serta menghilangkan fase yang lain yaitu fase Natrolite.

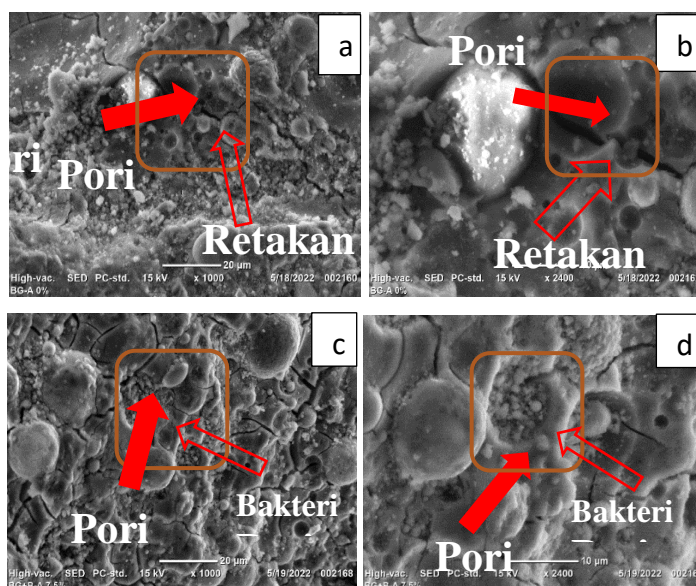
Sampel pertama tanpa penambahan agregat memiliki kandungan *Quartz* (SiO₂) sekitar 21 wt% dengan intensitas 4066 cps pada sudut 2-theta 26,72°, yang membentuk struktur kristal. Adapun fase lain yang terbentuk yaitu *Calcite* (CaCO₃) 37 wt%, *Natrolite* Na₂(Al₂Si₃O₁₀)(H₂O)₂ 16,1 wt%, *Mullite* (Al₄SiO₉) 17 wt% dan *Rutile* (TiO₂) 9 wt%. Sedangkan sampel kedua dengan penambahan agregat sebanyak 13,8% memiliki kandungan *Quartz* (SiO₂) sekitar 15,5 wt% dengan intensitas 2351

cps pada sudut 2-theta $26,97^\circ$, *Calcite* (CaCO_3) 58 wt%, *Zeolite* $\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}) (\text{H}_2\text{O})$ 13,5 wt%, *Mullite* (Al_4SiO_9) 11,1 wt% dan *Rutile* (TiO_2) 1,93 wt%.

Hal ini menunjukkan sampel yang ditambah agregat menyebabkan menurunnya fase *Quartz* dan fase *Mullite* sedangkan fase *Calcite* semakin meningkat. Penurunan jumlah *Mullite* dan *Zeolite* pada sampel yang ditambahkan bakteri disebabkan oleh pemanfaatan unsur aluminium, hidrogen, dan natrium oleh bakteri untuk metabolisme selulernya. Pada sampel 13.8% terdapat fase *Zeolite* serta menghilangkan fase yang lain yaitu fase *Natrolite*, hal ini memungkinkan terjadinya ketidakseimbangan rasio Al/Si pada agregat dan *fly ash* yang digunakan sehingga menyebabkan munculnya fase baru pada sampel.

2. Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dilakukan untuk mengetahui morfologi sampel, struktur mikro permukaan material (termasuk porositas dan pembentukan retakan) dan antar muka (interface) antara agregat-matriks. Pencitraan SEM dilakukan dengan perbesaran 1000x dan 2400x seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Karakterisasi SEM Beton Geopolimer (a, b) tanpa Agregat dan (c, d) dengan menggunakan agregat 13,8% Masing-masing Perbesaran 1000x dan 2400x

Gambar 2 menunjukkan morfologi sampel beton geopolimer dengan dan tanpa agregat. Terlihat morfologi sampel tanpa agregat Gambar 2 (a dan b) menunjukkan morfologi permukaan yang tidak homogen. Hal ini mengindikasikan pembentukan pori-pori tidak terdistribusi merata dan dengan ukuran yang bervariasi. Pada Gambar 2 (a) perbesaran 1000x mulai terlihat retakan pada sampel tanpa agregat, dan retakan tersebut lebih jelas pada Gambar 2 (b) perbesaran 2400x. Sedangkan morfologi sampel yang menggunakan agregat 13,8% ditunjukkan pada Gambar 2 (c dan d), bahwa struktur bahan dasar dan agregat tidak homogen karena bentuk dan ukuran partikel yang juga tidak serupa. Namun pada permukaan sampel menunjukkan bahwa berkurangnya pori-pori ketika penambahan bakteri

dimana bakteri tersebut mengisi pori-pori yang terbuka pada sampel, namun masih menimbulkan retakan kecil.

Menurut penelitian Wulandari et al., (2021), bahwa penambahan agregat dan bakteri pada beton geopolimer mengakibatkan peningkatan nilai kuat tekan dan penurunan porositas. Pada penelitian ini berbanding lurus dengan penelitian tersebut, bahwa bakteri dalam sampel dapat tumbuh dengan baik setelah 28 hari dalam campuran pasta geopolimer/

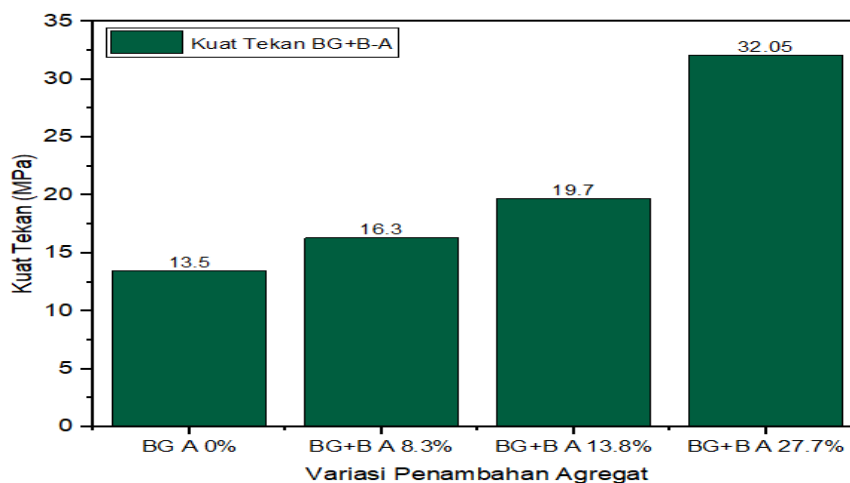
3. Kekuatan Mekanik

Pengujian kuat tekan dilakukan pada sampel dengan 4 komposisi yaitu BG A 0%, BG+BA 8,3%, BG+BA 13,8% dan BG+BA 27,7%. Sebelum dilakukan pengujian, terlebih dahulu sampel didiamkan selama 28 hari. Berikut adalah hasil pengujian sampel beton geopolimer dari empat komposisi. Nilai rata-rata kuat tekan beton geopolimer yang dihasilkan untuk empat komposisi ditunjukkan pada tabel 2. Penambahan 25 gram agregat kedalam geopolimer mampu meningkatkan kekuatan tekan sebesar 32,05 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak agregat yang ditambahkan, maka semakin besar nilai kuat tekan.

Tabel 2. Hasil Kuat Tekan Rata-rata Beton Geopolimer dengan Komposisi berbeda

Kode Sampel	Agregat (gram)	Konsentrasi Bakteri (mL)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
BG A 0%	0,0	0,00	13,5
BG+B A 8,3%	7,5	0,03	16,3
BG+B A 13,8%	12,5	0,03	19,7
BG+B A 27,7%	25,0	0,03	32,05

Pengujian kekuatan tekan sampel dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan dalam menahan beban hingga retak. Sampel beton geopolimer diuji setelah berusia 28 hari. Gambar 3. menunjukkan bahwa penambahan agregat dengan variasi 0%, 8,3%, 13,8% dan 27,7% memiliki pengaruh terhadap kuat tekan sampel beton geopolimer. Pada gambar diperoleh kuat tekan maksimum terdapat pada sampel 27,7% sebesar 32,05 MPa.



Gambar 3. Diagram batang hasil kuat tekan sampel beton geopolimer dengan variasi penambahan agregat 0%, 8,3%, 13,8% dan 27,7%.

Menurut Karyawan et al., 2019, meningkatnya konsentrasi agregat buatan menyebabkan sifat mekanik semakin besar, sehingga menyebabkan agregat geopolimer menjadi pilihan untuk digunakan sebagai bahan konstruksi. Selain itu, kekuatan tekan juga dipengaruhi oleh bakteri yang ditambahkan ke sampel beton geopolimer. Dimana bakteri dapat menutupi pori yang ada pada sampel hingga menyebabkan sampel mengalami peningkatan kekuatan tekan. Hal tersebut seiring dengan penelitian Wulandari et al., (2021), bahwa kekuatan beton meningkat dengan menambahkan mikroba seperti bakteri ke dalam beton. Penambahan mikroba ke dalam campuran telah meningkatkan kekuatan beton geopolimer berbasis *fly ash* karena peningkatan jumlah kalsit yang mengisi setiap mikropori, sehingga meningkatkan kuat tekan. Proses pencampuran agregat memiliki nilai batas ambang yang disebut Upper limit dan lower limit. Lower limit merupakan hasil terendah setelah penambahan agregat, sedangkan Upper limit adalah batas ambang maksimal penambahan agregat sehingga menurunkan kekuatan tekan spesimen. Penambahan agregat yang lebih besar menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan kinerja perekat antara matriks dan agregat.

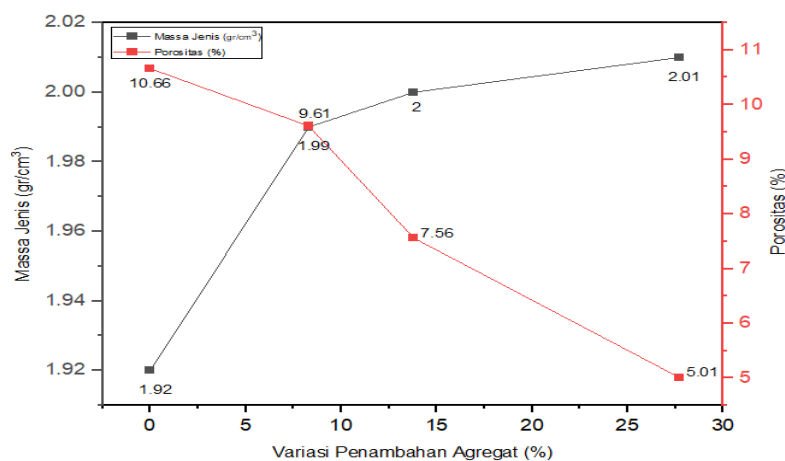
4. Massa Jenis dan Porositas

Pengujian massa jenis dan porositas dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan agregat dengan bakteri terhadap sifat fisik beton geopolimer. Pengujian massa jenis dan porositas dilakukan dengan menggunakan metode Archimedes dan pengukuran dilakukan secara berulang (sebanyak 3 kali pengukuran) yang terdiri dari empat komposisi dengan variasi penambahan agregat, yaitu 0%, 8,3%, 13,8% dan 27,7% relatif terhadap massa *fly ash*. Hubungan antara penambahan agregat dengan massa jenis rata-rata dan porositas rata-rata sampel beton geopolimer yang dihasilkan untuk empat komposisi ditunjukkan pada table 3.

Tabel 3. Hubungan antara Penambahan Agregat dengan Massa Jenis Rata-rata dan Porositas Rata-rata Beton Geopolimer

Kode	Massa Jenis Rata-rata (gr/cm ³)	Porositas Rata-rata (%)
BG-A 0%	1,92 ± 0,06	10,66 ± 6,01
BG+B-A 8,3%	1,99 ± 0,09	9,61 ± 1,95
BG+B-A 13,8%	2,00 ± 0,06	7,56 ± 0,74
BG+B-A 27,7%	2,01 ± 0,05	5,01 ± 1,39

Pengujian massa jenis dan porositas dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penambahan agregat dengan bakteri terhadap nilai massa jenis dan porositas beton geopolimer. Gambar 4 menunjukkan nilai massa jenis dan porositas rata-rata beton geopolimer dengan variasi penambahan agregat 0%, 8,3%, 13,8% dan 27,7%. Massa jenis menggambarkan kerapatan massa dalam struktur sebuah material. Sehingga, apabila porositasnya meningkat maka massa jenis akan menurun karena adanya ruang kosong dalam material tersebut.



Gambar 4. Grafik Hubungan antara Penambahan Agregat terhadap Massa Jenis Rata-rata dan Porositas Rata-rata Sampel

Berdasarkan grafik pada Gambar 4 terlihat bahwa penambahan bakteri dan agregat mengakibatkan massa jenis sampel meningkat sedangkan porositas sampel menurun. Peningkatan nilai massa jenis sejalan dengan meningkatnya nilai kuat tekan dari sampel tersebut. Massa jenis suatu material menggambarkan kerapatan massa dalam struktur sebuah material. Berarti semakin besar massa jenis suatu material, maka kerapatan strukturnya semakin rapat sehingga nilai kuat tekan juga akan tinggi (Chahal et al., 2012).

D. SIMPULAN

1. Geopolimer disintesis melalui metode aktivasi *fly-ash* dengan larutan alkali teraktivasi telah berhasil digabungkan dengan agregat dan ditambahkan bakteri sebagai penguat sehingga membentuk beton geopolimer.
2. Sifat struktur dan morfologi beton geopolimer diperoleh dari data hasil XRD dan SEM dan ditemukan adanya fase *Quartz*, *Calcite*, *Mullite*, *Rutil*, *Natrolite* dan *Zeolite* dengan konsentrasi kandungan yang berbeda. Struktur morfologi dari sampel dengan agregat menunjukkan bahwa berkurangnya pori-pori karena bakteri dalam agregat mengisi pori-pori yang terbuka pada sampel.
3. Sifat mekanik beton geopolimer dikarakterisasi melalui kuat tekan dan ditemukan bahwa penambahan agregat mempengaruhi sifat mekanik matriks geopolimer. Massa jenis beton geopolimer meningkat seiring dengan pertambahan agregat, sedangkan porositas menurun seiring penambahan agregat.

DAFTAR RUJUKAN

- Afifah, S., Soebandono, B., & Cahyati, M. D. (n.d.). *Naskah Seminar Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*. 8.
- Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>

- Herlambang, W. (2017). *Bio Concrete: Self-Healing Concrete, Aplikasi Mikroorganisme Sebagai Solusi Pemeliharaan Infrastruktur Rendah Biaya*. 6.
- Ikomudin, R. A., Herbudiman, B., & Irawan, R. R. (n.d.). *Ketahanan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Sulfat dan Klorida*. 11.
- Karyawan, I. D. M. A., Ekaputri, J. J., Widyatmoko, I., & Ariatedja, E. (2019). The Effects of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ Ratios on the Volumetric Properties of Fly Ash Geopolymer Artificial Aggregates. *Materials Science Forum*, 967, 228–235. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.967.228>
- Kumar Jogi, P., & Vara Lakshmi, T. V. S. (2021). Self healing concrete based on different bacteria: A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1246–1252. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.765>
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2014). *Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash)*. 6.
- Rizal, F., Syahyadi, R., & Jaya, Z. (2020). *Viabilitas Bakteri Bacillus Subtilis sebagai Self Healing Agent pada Mortar Geopolimer*. 7.
- Tziviloglou, E., Pan, Z., Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2017). Bio-based Self-healing Mortar: An Experimental and Numerical Study. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 15(9), 536–543. <https://doi.org/10.3151/jact.15.536>
- Wulandari, K. D., Ekaputri, J. J., Triwulan, Kurniawan, S. B., Primaningtyas, W. E., Abdullah, S. R. S., Ismail, N. 'Izzati, & Imron, M. F. (2021). Effect of microbes addition on the properties and surface morphology of fly ash-based geopolymer paste. *Journal of Building Engineering*, 33, 101596. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101596>