

Immobilization of *Bacillus subtilis* on Fly Ash-Based Geopolymers with Biochar as a Self-Healing Material

Ummi Kulsum¹, Triastuti Sulistyarningsih^{*2}, Ella Kusumastuti^{*3}

^{1,2}Program Studi Kimia, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang

Info Artikel

Diterima : 26-04-2024

Disetujui : 26-09-2024

Dipublikasikan : 25-11-2024

Keywords:

fly ash, *self healing geopolymer*,
Bacillus subtilis

Abstrak

Geopolimer merupakan material konstruksi yang ramah lingkungan namun tidak luput dari kerusakan berupa retak. Salah satu upaya untuk memperbaiki dan menutup *microcrack* pada geopolimer yaitu *self healing* geopolimer, dengan cara menambahkan *healing agent* ke dalamnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak penambahan bakteri *Bacillus subtilis* sebagai *healing agent* terhadap kualitas geopolimer. Sintesis geopolimer dilakukan dengan mencampurkan larutan alkali dan *fly ash*, selanjutnya *Bacillus subtilis* dan kalsium laktat dimasukkan dalam *biochar* dengan variasi tingkat pengenceran bakteri 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} dan ditambahkan ke dalam pasta geopolimer. Kualitas geopolimer yang dihasilkan dianalisis dengan uji UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) dan uji kuat tekan. Analisis kualitatif dilakukan pada geopolimer terbaik yaitu analisis gugus fungsi dengan FT-IR, fasa mineral dengan XRD, dan morfologi permukaan dengan SEM-EDX. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *healing agent* memberikan peningkatan hasil UPV dan nilai kuat tekan. Geopolimer yang memiliki kualitas terbaik dalam penelitian ini yaitu geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-1} (G-1) dengan nilai kuat tekan sebesar 20,6664 MPa. Hasil analisis gugus fungsi pada sampel geopolimer dengan dan tanpa penambahan *healing agent* tidak menghasilkan perubahan yang signifikan. Hasil analisis fasa mineral menunjukkan fasa amorf geopolimer. Hasil morfologi menunjukkan terbentuknya matriks geopolimer yang homogen.

Abstract

Geopolymer is an environmentally friendly construction material but is not immune to damage in the form of cracks. One effort to repair and close microcracks in geopolymer is self-healing geopolymer, by adding healing agents to it. This research aims to determine the impact of adding *Bacillus subtilis* bacteria as a healing agent on the quality of geopolymer. Geopolymer synthesis was carried out by mixing alkaline solution and fly ash, then *Bacillus subtilis* and calcium lactate were added to biochar with varying levels of bacterial dilution 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} and added into geopolymer paste. The quality of the resulting geopolymer was analyzed using the UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) test and compressive strength test. Qualitative analysis was carried out on the best geopolymers, namely functional group analysis using FT-IR, mineral phases using XRD, and surface morphology using SEM-EDX. The research results show that the addition of healing agents provides an increase in UPV results and compressive strength values. The geopolymer that has the best quality in this research is geopolymer with the addition of *Bacillus subtilis* bacteria at a dilution of 10^{-1} (G-1) with a compressive strength value of 20.6664 MPa. The results of functional group analysis on geopolymer samples with and without the addition of healing agents did not produce significant changes. The results of mineral phase analysis show an amorphous phase of geopolymer. Morphology results show the formation of a homogeneous geopolymer matrix.

Pendahuluan

Keretakan pada beton merupakan masalah yang besar dan memerlukan biaya yang tidak sedikit untuk memperbaikinya. Apalagi jika lokasi keretakan tersebut sulit dijangkau. Jika tidak segera ditanggulangi, maka keretakan tersebut dapat memperburuk kualitas dari beton. Dengan pengembangannya, mikroorganisme terbukti telah ditemukan lebih aman, lebih alami dan lebih berkelanjutan dalam kegunaannya sebagai *self healing agent*. Ketika keretakan muncul, udara dan air mengaktifkan mikroorganisme sehingga akan mengendapkan biomineral dan menutup retakan (Doctolero *et al.*, 2020). Metabolisme bakteri untuk menghasilkan CaCO_3 terjadi karena bakteri menghasilkan enzim urease yang berfungsi sebagai katalisator pada proses hidrolisis urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) untuk membentuk ammonium (NH_4^+) dan karbonat (CO_3^{2-}) serta dapat juga disebabkan karena metabolisme bakteri mengubah senyawa organik kalsium laktat menjadi kalsium karbonat.

Geopolimer adalah material alternatif untuk mengurangi penggunaan semen yang menarik minat para ilmuwan. Geopolimer merupakan polimer anorganik yang dihasilkan oleh reaksi alkali aktivator dan bahan baku yang kaya alumino-silikat (Garces *et al.*, 2021). Geopolimer dibuat dari senyawa aluminosilikat, yang dapat ditemukan dalam produk sampingan limbah seperti *fly ash* dan larutan alkali melalui proses geopolimerisasi (Doctolero *et al.*, 2020). Geopolimer bersifat rendah karbon, memiliki sifat kimia dan mekanik yang sangat baik sehingga dimanfaatkan sebagai alternatif material yang bersifat sementara.

Beton geopolimer memiliki beberapa keunggulan, seperti lebih ramah lingkungan (pada proses pembuatannya tidak melepaskan emisi CO_2 ke atmosfer), lebih tahan terhadap serangan kimia (seperti asam sulfat dan asam klorida), dan lebih tahan terhadap temperatur tinggi. Namun disamping kelebihanannya, geopolimer juga memiliki karakteristik yang sangat getas dengan kekuatan tarik yang rendah sehingga mudah terjadi keretakan pada permukaannya. Geopolimer terbentuk melalui proses reaksi kimia dan sangat alkali (basa) sehingga perlu diketahui *self healing agent* yang dapat digunakan pada proses *self healing* geopolimer.

Spora bakteri genus *Bacillus* dapat tahan terhadap tanah alkali sehingga digunakan sebagai *self healing agent* dengan cara mencampurkan secara langsung ke dalam campuran beton. Pada prinsipnya, bakteri berperan sebagai katalisator dan mengubah senyawa prekursor menjadi kalsium karbonat sebagai material pengisi retak. Senyawa prekursor yang paling tepat dalam menyediakan mekanisme *self-healing* adalah kalsium laktat. Pengaruh kalsium laktat dan bakteri yang telah ditambahkan dapat meningkatkan nilai kuat tekan yang dihasilkan (Luo & Qian, 2016).

Dalam melindungi bakteri dalam geopolimer dengan kondisi basa yang tinggi serta dari tegangan mekanis selama sintesis geopolimer dapat digunakan material yang memiliki struktur berpori sebagai media imobilisasi. *Biochar* memiliki struktur pori yang dapat menampung endospora bakteri. *Biochar* juga memiliki afinitas yang tinggi yang dapat digunakan untuk penyerapan dan retensi cairan.

Sehingga pada penelitian ini, *biochar* diusulkan sebagai material pembawa bakteri (Gupta *et al.*, 2018). *Bacillus subtilis* telah dipelajari penggunaannya pada beton untuk meningkatkan kekuatan beton, sehingga penelitian ini dilakukan untuk menyelidiki penambahan bakteri *Bacillus subtilis* dan *biochar* yang berpotensi dalam kemampuan *self healing* geopolimer.

Metode

Alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya neraca analitik (Ohaus), ayakan 100 *mesh*, kaca arloji, gelas *beaker*, pengaduk atau *mixer*, oven, *grinder*, cawan petri, tabung reaksi, cetakan silinder plastic, *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Universal Testing Machine* (alat uji kuat tekan), seperangkat alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). mBahan yang digunakan adalah *fly ash* dari PLTU Tanjungjati Jepara, natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis, natrium hidroksida (NaOH) teknis, akuades (H_2O), *Bacillus subtilis* dari Laboratorium Mikrobiologi STIFERA (Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi Nusaputera), *nutrient agar Merck*, kalsium laktat teknis, dan *biochar* sekam padi dari PPM Farma.

Preparasi *fly ash* dilakukan dengan diayak menggunakan ayakan 100 *mesh* dan dioven pada suhu 105°C selama 24 jam serta dianalisis menggunakan XRF. Preparasi agen *self healing* dilakukan dengan pengembangbiakan *Bacillus subtilis* dan biakan bakteri diencerkan menggunakan akuades steril pada tingkat pengenceran 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} dan 10^{-6} . *Biochar* dioven pada suhu 105°C selama 24 jam. Lalu digiling dan diayak menggunakan ayakan 120 *mesh* (Piccolo *et al.*, 2021). Pembuatan larutan alkali activator dilakukan dengan melarutkan 4 g NaOH ke dalam 8 mL H_2O dan diaduk menggunakan spatula hingga larut sempurna. Larutan NaOH didiamkan selama 24 jam agar proses eksotermal selesai (Syukur dan Kusumawati, 2019). Setelah itu, 10 g NaSiO_3 dicampurkan ke dalam larutan NaOH dan diaduk hingga larut.

Sintesis geopolimer dilakukan dengan mencampurkan larutan alkali dan *fly ash* hingga terbentuk pasta geopolimer. 1,6 mL bakteri *Bacillus subtilis* dan 3,2 g kalsium laktat dimasukkan dalam 0,8 g *biochar*, lalu ditambahkan dan dicampur dengan pasta geopolimer dan dihomogenkan dengan kecepatan sedang dengan

bantuan *mixer* selama 5 menit (Gupta *et al.*, 2018). Pasta geopolimer dituang dalam cetakan silinder plastik (perbandingan diameter dan tinggi silinder yaitu 1 : 2).

Pengukuran UPV (menggunakan transduser 150-kHz) dilakukan pada umur simpan geopolimer 7, 14, 21, 28, dan 49 hari. Prosedur uji UPV dilakukan dengan mengoleskan permukaan beton dengan *grease* (gemuk) dan menjalankan alat uji UPV lalu mencatat kecepatan gelombang longitudinal yang dihasilkan. Parameter kualitas beton berdasarkan hasil tes UPV dapat dilihat dari Tabel 1.

Tabel 1. Kualitas Beton berdasarkan UPV

Kecepatan Gelombang Longitudinal (m/s)	Kualitas Beton
> 4500	Sangat baik
3500 – 4500	Baik
3000 – 3500	Cukup baik
2000 – 3000	Buruk
< 2000	Sangat buruk

(Rizal, Syahyadi dan Jaya, 2020)

Uji kuat tekan dilakukan dilakukan dengan menggunakan mesin uji kuat tekan (Universal Testing Machine). Sampel uji tersebut dikenakan dengan beban tertentu sampai sampel uji hancur dan pecah. Data yang didapatkan dari uji ini berupa beban terbesar yang dapat ditahan hingga sampel uji tersebut pecah dan hancur (kg). Kuat tekan geopolimer diperoleh dengan mensubstitusikan berat beban tersebut sebagai P dalam persamaan berikut.

$$F_m = P/A$$

Dengan :

F_m : kuat tekan dalam MPa

P : beban maksimum total dalam N

A : luas permukaan yang dibebani dalam mm²

Analisis kualitatif dilakukan pada geopolimer kontrol, geopolimer dengan nilai kuat tekan tertinggi dan nilai kuat tekan terendah. Analisis gugus fungsi dengan Fourier Transform Infrared (FTIR). Teknik yang akan digunakan untuk preparasi sampel geopolimer adalah teknik KBr dengan perbandingan sampel 2-3 mg sampel dalam 200-300 mg KBr. Data yang dihasilkan berupa intensitas serapan (%T) serta bilangan gelombang (cm⁻¹). Analisis hasil data dilakukan dengan melihat pita-pita serapan pada bilangan gelombang yang dihasilkan. Analisis fasa mineral dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD). Data yang dihasilkan yaitu intensitas dan sudut difraksi (2θ). Pola difraktogram standar dicocokkan dengan setiap sudut difraksi yang dihasilkan melalui teknik search and match sehingga dapat dianalisis fasa mineralnya (Rahman, 2016). Analisis morfologi dan komposisi geopolimer dengan SEM-EDX. Sampel geopolimer diambil sebanyak 0,1 g dan ditempatkan di dalam cawan holder lalu dilapisi emas lalu dimasukkan ke dalam evaporator vakum. Hasil analisis yang diperoleh berupa gambar mikroskop untuk dilihat bentuk dan sebaran partikelnya (Anwar dan Kusumastuti, 2016).

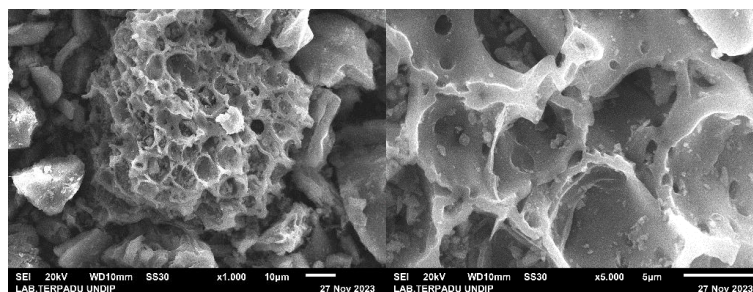
Hasil dan Pembahasan

Sampel *fly ash* PLTU Tanjung Jati Jepara dikarakterisasi menggunakan XRF untuk mengetahui kandungan kimianya. Hasil XRF *fly ash* ditampilkan pada Tabel 2. Hasil analisis komposisi kimia *fly ash* PLTU Tanjungjati Jepara menyatakan bahwa *fly ash* mengandung komponen yang heterogen dengan komponen utama yang meliputi: SiO₂ 30,4 %; Al₂O₃ 13,7 %; Fe₂O₃ 11,3 %; dan CaO 3,67 %. Berdasarkan kandungan CaO yang terdapat pada *fly ash* PLTU Tanjungjati Jepara termasuk golongan *fly ash* kelas F, yaitu *fly ash* yang memiliki kandungan CaO < 10 % (Suraneni *et al.*, 2021).

Tabel 2. Hasil analisis XRF *fly ash*

Komponen	% berat
SiO ₂	30,4000
Fe ₂ O ₃	11,3000
Al ₂ O ₃	13,7000
CaO	3,6700
SO ₃	0,8410
K ₂ O	1,7900
TiO ₂	0,9660
MgO	1,0000
P ₂ O ₅	0,2020
MnO	0,0708
NiO	0,0139
CuO	0,0146
ZnO	0,0200
Rb ₂ O	0,0173
SrO	0,1110
ZrO ₂	0,0435
BaO	0,1670

Morfologi *biochar* dipindai menggunakan SEM yang ditunjukkan pada Gambar 1

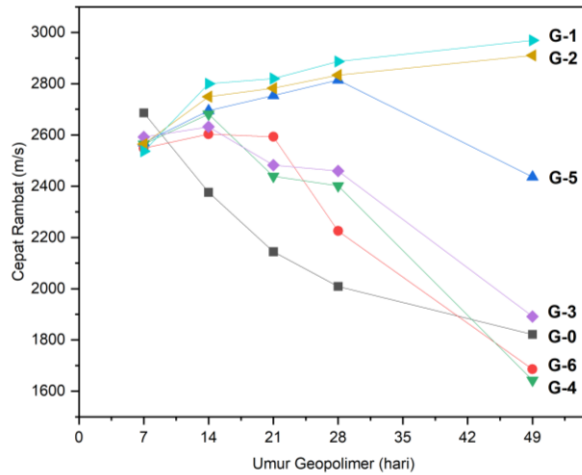


Gambar 1. Hasil SEM gambar morfologi *biochar* sekam padi pada perbesaran 500 dan 1000x

Biochar sekam padi banyak mengandung pori-pori pada permukaannya. Pori ini diperlukan dalam sintesis geopolimer untuk melindungi bakteri dari tegangan mekanis selama proses sintesis geopolimer.

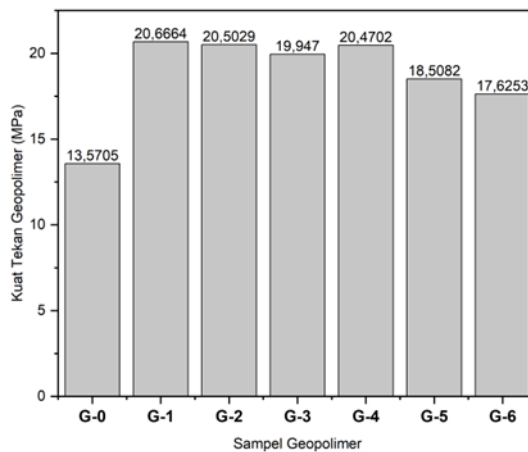
Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) pada Sampel Geopolimer

Data cepat rambat gelombang pada benda uji geopolimer berdasarkan umur pengamatan dengan jarak tempuh pengujian UPV ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik pada Gambar 2. menunjukkan bahwa geopolimer dengan kode G-1 (geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10⁻¹) dan G-2 (geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10⁻²) terus terjadi peningkatan cepat rambat meskipun masih tergolong dalam kualitas yang buruk. Hal tersebut menandakan bahwa bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10⁻¹ dan 10⁻² mengalami aktifitas *self healing* yang baik dan mengalami penurunan aktivitas seiring dengan konsentrasi bakteri yang semakin encer. Berdasarkan penelitian Nugroho *et al.* (2015) semakin banyak bakteri yang ditambahkan pada suatu material maka semakin baik mekanisme *self healing* yang terjadi. Terjadinya penurunan cepat rambat geopolimer dikarenakan aktivitas *self healing* geopolimer yang sudah tidak efisien. Efisiensi *self healing* geopolimer bergantung pada jenis bakteri, pH, suhu, kelembaban dan ketersediaan nutrisi. Apabila kondisi lingkungan tidak menguntungkan dan tidak adanya nutrisi maka bakteri menjadi tidak aktif dan dimungkinkan akan mengganggu mekanisme *self healing* geopolimer (Shaheen *et al.*, 2019). Faktor pembacaan alat yang kurang teliti juga menyebabkan beberapa data tidak terakomodasi secara sempurna.



Gambar 2. Hubungan cepat rambat geopolimer terhadap umur geopolimer

Pengujian Kuat Tekan pada Sampel Geopolimer

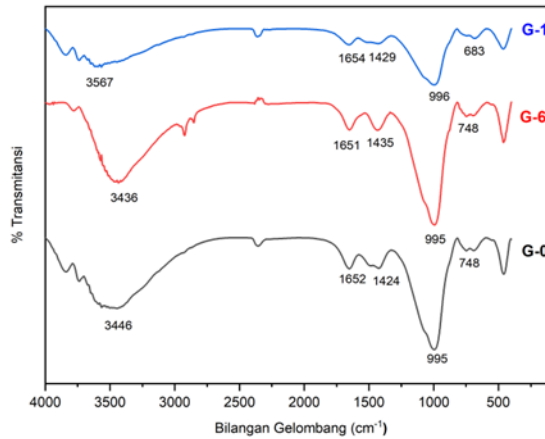


Gambar 3. Grafik kuat tekan geopolimer hasil sintesis variasi G-0 (tanpa penambahan *biochar* dan *Bacillus subtilis*, variasi G-1 – G-6 (dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10⁻¹ - 10⁻⁶ dan *biochar*) pada umur 49 hari

Kuat tekan geopolimer tertinggi yang dihasilkan pada penelitian ini yaitu sampel geopolimer G-1 dimana sampel dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10⁻¹ sebesar 20,6664 MPa dan dapat meningkatkan nilai kuat tekan 0,52% dibandingkan geopolimer kontrol yang dapat dikategorikan pada beton dengan kualitas sedang. Beton dengan kualitas yang sedang adalah beton yang digunakan untuk pengerjaan struktural dengan nilai kekuatan tekan karakteristik K-250 – K-500 g/cm³ atau sekitar 20-40 MPa (SNI 03-2847-2002).

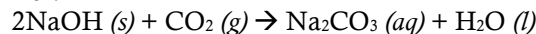
Data hasil kuat tekan geopolimer G-1 dan G-2 selaras dengan hasil kualitas geopolimer yang diukur berdasarkan UPV. Penambahan *self healing agent* dapat meningkatkan kuat tekan yang mengindikasikan bahwa aktivitas bakteri *Bacillus subtilis* dan kalsium laktat sebagai prekursor dapat menghasilkan CaCO₃ dalam pori beton atau *microcracks* sehingga membuat struktur internal geopolimer lebih kompak (Schwantes-Cezario *et al.*, 2019).

Karakterisasi FTIR pada Sampel Geopolimer



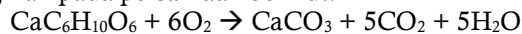
Gambar 4. Spektra FTIR geopolimer kontrol (G-0), geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-6} (G-6), dan geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-1} (G-1)

Analisis dengan FTIR dilakukan untuk mengetahui gugus fungsi yang terjadi pada geopolimer. Pita serapan pada bilangan gelombang 3446; 3436; 3567 dan 1650 cm^{-1} berturut-turut menunjukkan vibrasi ulur (*stretching*) O-H yang terikat pada struktur anorganik, dan vibrasi tekuk (*bending*) H-O-H. Pita serapan ini menunjukkan adanya molekul-molekul air yang terdapat pada permukaan atau terjebak dalam rongga-rongga struktur kerangka geopolimer.

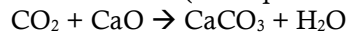


Reaksi karbonasi larutan natrium hidroksida (NaOH) dengan udara menghasilkan vibrasi ulur O-C-O dalam Na_2CO_3 yang terlihat dari pita serapan pada bilangan gelombang 1424; 1429; dan 1435 cm^{-1} (Timakul *et al.*, 2016). Pita serapan ini juga dapat mengindikasikan adanya CO_3 pada kalsit yang dihasilkan dari mekanisme *self healing* geopolimer (Guo *et al.*, 2023). Kandungan Si dan Al pada pasta geopolimer bereaksi dengan larutan alkali membentuk ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al sebagai pengikat polimerisasi yang berkontribusi terhadap sifat mekanik geopolimer. Proses geopolimerisasi hingga terbentuknya geopolimer ditandai dengan adanya pita serapan pada bilangan gelombang $1200\text{-}950\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan vibrasi ulur asimetri Si-O-Si atau Si-O-Al dan pita serapan pada $750\text{-}490\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan vibrasi tekuk Si-O-Si atau Si-O-Al (Alehyen *et al.*, 2017). Pita serapan pada bilangan gelombang 458, 459, dan 464 cm^{-1} berturut-turut menunjukkan vibrasi Ca-O.

Pembentukan CaCO_3 pada sampel geopolimer disebabkan oleh adanya dua komponen yaitu bakteri *Bacillus subtilis* dan kalsium laktat berdasarkan pada sistem *self healing*. Proses kimia pembentukan kalsium karbonat dari kalsium laktat disajikan pada persamaan berikut.

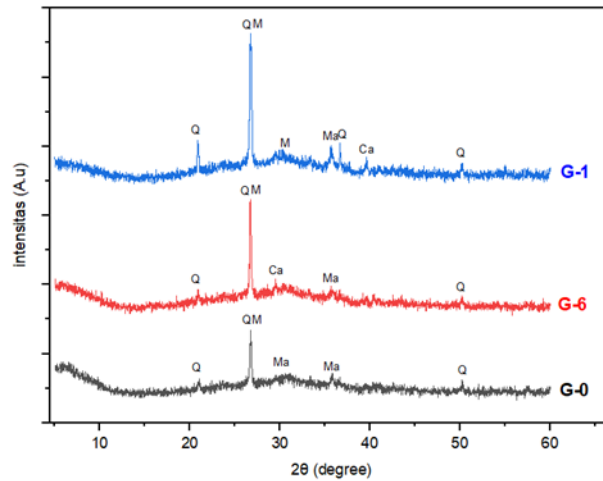


Adanya CaCO_3 tidak hanya pada geopolimer dengan penambahan *self healing agent*, namun juga terdapat pada geopolimer kontrol. Hal ini dapat terjadi karena adanya reaksi karbonasi CaO dalam *fly ash*. Proses karbonasi ini dinyatakan pada persamaan berikut (Khaliq & Ehsan, 2016)



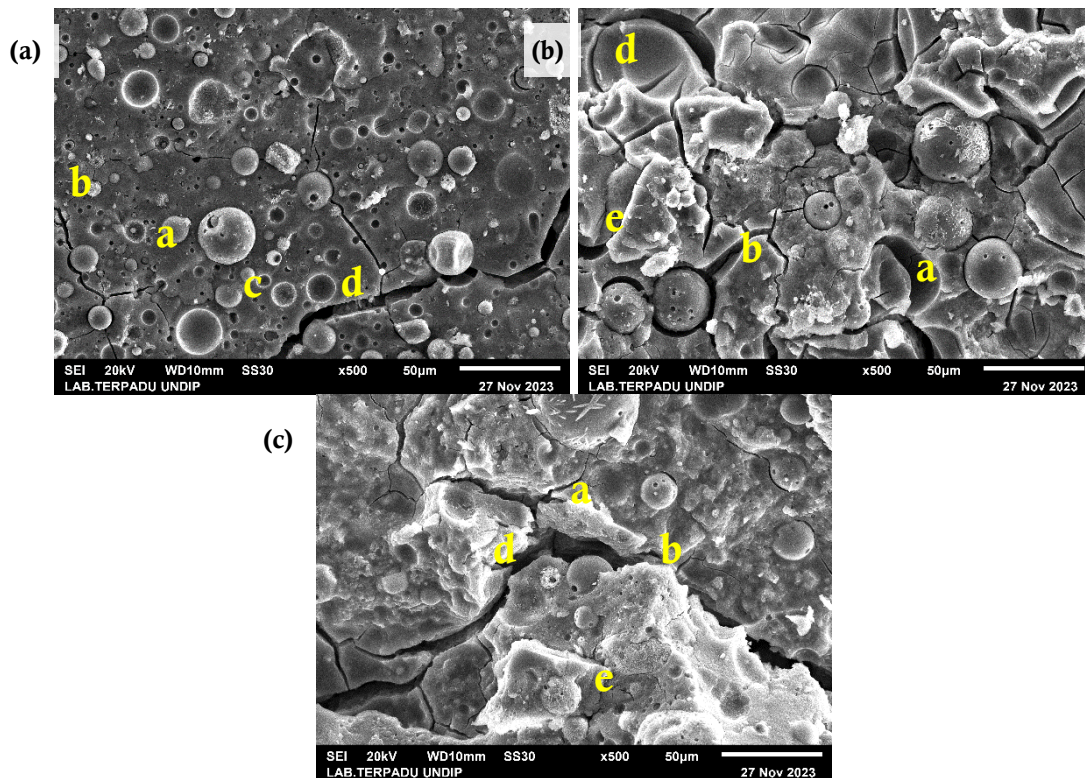
Karakterisasi XRD pada Sampel Geopolimer

Hasil analisis data difraktogram dari sampel geopolimer kontrol menunjukkan tiga mineral utama yaitu Quartz (SiO_2), Mullite ($\text{Si}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), dan Maghemite (Fe_2O_3). Mineral Quartz (SiO_2) sesuai dengan JCPDS 101-1160 yang ditunjukkan oleh puncak difraksi tajam pada $2\theta = 20,96; 26,72; 36,58; 50,20^\circ$. Mineral Mullite ($\text{Si}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) sesuai dengan JCPDS 901-0160 yang ditunjukkan pada puncak $2\theta = 23,60; 26,00; 26,26; 33,32^\circ$. Mineral Maghemite (Fe_2O_3) sesuai dengan JCPDS 900-6317 yang ditunjukkan pada puncak $2\theta = 30,38; 35,81^\circ$. Mineral kalsit (JCPDS 05-0586) yang ditandai dengan adanya puncak pada $2\theta = 29,11; 29,48; 30,98; 35,65^\circ$ dengan intensitas tertinggi pada $29,48^\circ$.



Gambar 5. Difraktogram geopolimer geopolimer kontrol (G-0), geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-6} (G-6), dan geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-1} (G-1)

Karakterisasi SEM-EDX



Gambar 6. Hasil analisis SEM sampel (a) geopolimer kontrol (G-0), (b) geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-6} (G-6), (c) geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-1} (G-1)

Hasil analisis sampel dengan SEM menunjukkan (a) abu layang yang tidak bereaksi, (b) matriks geopolimer, (c) pori, (d) retakan (*microcracks*), dan (e) kalsit. Hasil reaksi monomer-monomer alumina dan silika membentuk matriks geopolimer, dan semakin homogen matriks geopolimer maka nilai kuat tekan dan kuat tariknya juga semakin tinggi. Pada sampel G-1 dan G-2 menunjukkan adanya kalsit yang dihasilkan dari *Bacillus subtilis* dengan kalsium laktat yang ditambahkan ke dalam geopolimer. Kalsit yang dihasilkan dapat menutup *microcracks* dan pori-pori dalam sampel geopolimer. Hal ini didukung dengan penelitian Shaheen *et al.* (2021) yang menunjukkan struktur morfologi CaCO_3 amorf yang dihasilkan pada *self healing* beton menggunakan bakteri *Bacillus subtilis*.

Tabel 3. Hasil uji kandungan unsur dalam sampel geopolimer kontrol (G-0), geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-1} (G-1), dan geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-6} (G-6) menggunakan EDX

Unsur	Wt %		
	G-0	G-1	G-6
O	50,50	53,59	51,88
Si	15,73	14,38	15,13
Na	6,93	7,77	6,87
Ca	2,27	0,91	1,11
C	8,94	11,43	13,08
Al	6,68	6,69	6,69
Fe	5,99	3,15	2,67
Mg	1,07	0,68	0,75

Hasil analisis EDX menunjukkan adanya unsur Ca, C dan O yang dapat mengindikasikan terbentuknya CaCO_3 pada sampel geopolimer. Sumber kalsium yang dihasilkan berasal dari kalsium laktat dan *Bacillus subtilis* yang ditambahkan ke dalam geopolimer. Hal ini didukung pada penelitian Ekinci *et al.* (2022) yang menunjukkan pembentukan CaCO_3 pada *self healing* geopolimer menggunakan *Bacillus subtilis*. Namun, Tabel 3. menunjukkan bahwa pembentukan CaCO_3 ditemukan lebih tinggi pada sampel geopolimer kontrol dibandingkan sampel geopolimer dengan penambahan *self healing agent*. Hal ini bisa dimungkinkan karena sampel yang diuji hanya sebagian dari keseluruhan sampel sedangkan kalsit hasil metabolisme bakteri terbentuk pada pori atau *microcrack* dalam sampel geopolimer, sehingga kurang cukup mewakili adanya kandungan senyawa CaCO_3 dalam sampel geopolimer tersebut. Sebagaimana telah dijelaskan pada hasil FTIR, adanya CaCO_3 pada geopolimer kontrol dapat terjadi karena adanya reaksi karbonasi CaO dalam *fly ash* dengan CO_2 (Khaliq & Ehsan, 2016).

Kesimpulan

Didapatkan hasil bahwa penambahan *Bacillus subtilis*, kalsium laktat dan *biochar* sebagai *healing agent* berpengaruh terhadap kualitas geopolimer. Secara umum penambahan *healing agent* dapat meningkatkan nilai kuat tekan meskipun tidak signifikan. Geopolimer yang memiliki kualitas terbaik dalam penelitian ini yaitu geopolimer dengan penambahan bakteri *Bacillus subtilis* pada pengenceran 10^{-1} , karena memiliki hasil UPV dan nilai kuat tekan yang lebih baik. Penambahan *self healing agent* mempengaruhi hasil analisis gugus fungsi geopolimer dengan FTIR menunjukkan adanya vibrasi ulur dari CaCO_3 pada panjang gelombang 1380-1450 cm^{-1} . Terbentuknya rantai geopolimer ditandai dengan adanya vibrasi ulur asimetri dan vibrasi tekuk Si-O-Si atau Si-O-Al. Analisis XRD yang menunjukkan bahwa geopolimer mengandung fasa amorf dengan mineral utama *quartz* yang ditandai dengan adanya puncak melebar pada 2θ antara 20° sampai 40° . Analisis morfologi geopolimer menggunakan SEM menunjukkan terbentuknya matriks geopolimer yang homogen.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Dr. Triastuti Sulistyansih, M.Si dan Ella Kusumastuti, M.Si selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan ilmu serta bimbingan kepada penulis sehingga riset ini dapat terselesaikan tepat waktu. Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada civitas Universitas Negeri Semarang yang telah menyediakan fasilitas untuk mendukung jalannya kegiatan riset ini.

Daftar Referensi

- Alehyen, S., Achouri, M. EL, & Taibi, M. (2017). Characterization, Microstructure and Properties of Fly Ash Based Geopolymer. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(5), 1783–1796. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05647-x>
- Anwar, S., & Kusumastuti, E. (2016). Pemanfaatan Serat Pohon Pisang Dalam Sintesis Geopolimer Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 5(1), 1–6.
- Doctolero, J. Z. S., Beltran, A. B., Uba, M. O., Tigue, A. A. S., & Promentilla, M. A. B. (2020). Self-Healing Biogeopolymers Using Biochar-Immobilized Spores of Pure- and Co-Cultures of Bacteria. *Minerals*, 10(12), 1114. <https://doi.org/10.3390/min10121114>
- Ekinci, E., Türkmen, İ., & Birhanli, E. (2022). Performance of Self-Healing Geopolymer Paste Produced Using *Bacillus Subtilis*. *Construction and Building Materials*, 325(February), 126837.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126837>

- Garces, J. I. T., Dollente, I. J., Beltran, A. B., Tan, R. R., & Promentilla, M. A. B. (2021). Life Cycle Assessment of Self-Healing Geopolymer Concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 4(December 2020), 100147. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100147>
- Guo, X., Yuan, S., & Liu, X. (2023). The Self-Healing Properties and Mechanism of the Cracked Fly Ash-Based Engineered Geopolymer Composites (FA-EGC): Effects of Water and Temperature. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12(10), 1228–1241. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2213227>
- Gupta, S., Kua, H. W., & Pang, S. D. (2018). Healing Cement Mortar by Immobilization of Bacteria in Biochar: An Integrated Approach of Self-Healing and Carbon Sequestration. *Cement and Concrete Composites*, 86, 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.015>
- Khaliq, W., & Ehsan, M. B. (2016). Crack Healing in Concrete Using Various Bio Influenced Self-Healing Techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.006>
- Luo, M., & Qian, C. (2016). Influences of Bacteria-Based Self-Healing Agents on Cementitious Materials Hydration Kinetics and Compressive Strength. *Construction and Building Materials*, 121, 659–663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.075>
- Nugroho, A., Satyarno, I., & Subyakto, S. (2015). Bacteria as Self-Healing Agent in Mortar Cracks. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 47(3), 279–295. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.3.4>
- Piccolo, F., Andreola, F., Barbieri, L., & Lancellotti, I. (2021). Synthesis and Characterization of Biochar-Based Geopolymer Materials. *Applied Sciences*, 11(22), 10945. <https://doi.org/10.3390/app112210945>
- Rahman, S. (2016). Rancangan Eksperimen Analisis Struktur Mikro Sampel dengan Prinsip XRD Menggunakan Metode Kristal Berputar. *Jurnal Riset Dan Kajian Pendidikan Fisika*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.12928/jrkpf.v3i1.4538>
- Rizal, F., Syahyadi, R., & Jaya, Z. (2020). Viabilitas Bakteri Bacillus Subtilis sebagai Self Healing Agent pada Mortar Geopolimer. *Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 4(1), 6–12.
- Schwantes-Cezario, N., Porto, M. F., Sandoval, G. F. B., Nogueira, G. F. N., Couto, A. F., & Toralles, B. M. (2019). Effects of Bacillus subtilis Biocementation on the Mechanical Properties of Mortars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(1), 31–38. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952019000100005>
- Shaheen, N., Jalil, A., Adnan, F., & Arsalan Khushnood, R. (2021). Isolation of Alkaliphilic Calcifying Bacteria and Their Feasibility for Enhanced CaCO₃ Precipitation in Bio-Based Cementitious Composites. *Microbial Biotechnology*, 14(3), 1044–1059. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13752>
- Shaheen, N., Khushnood, R. A., Khaliq, W., Murtaza, H., Iqbal, R., & Khan, M. H. (2019). Synthesis and Characterization of Bio-Immobilized Nano/Micro Inert and Reactive Additives for Feasibility Investigation in Self-Healing Concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 492–506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.202>
- SNI 03-2847-2002. (n.d.). *Tata Cara Penghitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung. Standar Nasional Indonesia*.
- Suraneni, P., Burris, L., Shearer, C. R., & Hooton, R. D. (2021). ASTM C618 Fly Ash Specification: Comparison with Other Specifications, Shortcomings, and Solutions. *ACI Materials Journal*, 118(1), 157–167. <https://doi.org/10.14359/51725994>
- Syukur, M., & Kusumawati, E. (2019). Sintesis dan Karakterisasi Foamy Geopolymer Berbahan Dasar Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 7(1), 83–90. <https://doi.org/10.15294/ijcs.v4i3.8281>
- Timakul, P., Rattanaprasit, W., & Aungkavattana, P. (2016). Enhancement of Compressive Strength and Thermal Shock Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Composites. *Construction and Building Materials*, 121, 653–658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.037>