

# Viabilitas Bakteri *Bacillus Subtilis* sebagai Self Healing Agent pada Mortar Geopolimer

Faisal Rizal<sup>1</sup>, Rizal Syahyadi<sup>2</sup>, Hanif<sup>3</sup>, Zairipan Jaya<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe  
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

<sup>1</sup>faisalrizal@pnl.ac.id

**Abstrak**— Keretakan pada permukaan beton merupakan masalah besar dan memerlukan biaya perbaikan yang besar, apalagi jika keretakan tersebut berada pada lokasi yang sulit dijangkau, jika tidak ditanggulangi keretakan akan menimbulkan kerusakan pada tulangan. Pengembangan mikroorganisme yang ditanamkan pada beton membuat keretakan dapat segera tertanggulangi dengan kristal kalsium karbonat yang dihasilkan oleh mikroorganisme. Penelitian ini dilakukan terhadap beton geopolimer yang merupakan salah satu inovasi dalam menggantikan beton konvensional, dikarenakan lebih ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan keretakan yang terjadi pada geopolimer dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* sebagai *self healing agent*. Penelitian ini menggunakan *fly ash* dari PLTU Nagan Raya dan bakteri *Bacillus Subtilis* yang berperan sebagai *self healing agent*. Prosedur untuk pengikat mortar geopolimer mengacu pada prosedur konvensional. Metode yang digunakan untuk pengujian UPV mengacu pada standar ASTM C 597-02 IDT. Penelitian ini dilakukan terhadap 3 jenis konsentrasi NaOH yaitu 4M, 10M dan 16M, dengan rasio pencampuran larutan NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> = 2,5. Variasi bakteri *b. subtilis* dan kalsium laktat adalah 1%+2%; 1,5%+3% dan 2%+4%. Benda uji yang digunakan adalah mortar kubus berukuran 10x10x10 cm dengan jumlah benda uji sebanyak 48 buah, pengujian dilakukan pada umur 14, 21 dan 28 hari. Pengukuran pH larutan alkali dan pH mortar dilakukan untuk mengetahui tingkat keasambasaan larutan NaOH. Hasil pengukuran menunjukkan nilai terendah berada pada pH 11,71 dan nilai tertinggi pada pH 12,61. Maka dapat disimpulkan bakteri tersebut mampu bertahan hidup pada 3 jenis konsentrasi NaOH. Hasil dari pengujian UPV menunjukkan bahwa semakin bertambahnya umur mortar maka semakin tinggi pertumbuhan bakteri dalam menutupi retakan. Tetapi hal sebaliknya terjadi pada nilai UPV yang mana semakin bertambahnya persentase kandungan bakteri maka semakin menurun pula pertumbuhan dari bakteri dalam menutupi retakan, dengan nilai persentase optimum pertumbuhan bakteri sebesar 38,45%.

**Kata kunci**— Keretakan, Geopolimer, Bakteri *Bacillus Subtilis*, pH, UPV

**Abstract**— Cracks in concrete surfaces is a major problem and require substantial repair costs, especially if the cracks are located at locations which are difficult to reach, if not corrected, cracks will cause damage to the reinforcement. The development of microorganisms that are embedded in concrete made readily insurmountable rift with calcium carbonate crystals produced by microorganisms. This research was conducted on geopolymer concrete, which is one of the innovations in substituting conventional concrete because it is more eco-friendly. This study aims to solve the problems of cracks that occur in geopolymer using *Bacillus subtilis* bacteria as self healing agent. This study used fly ash from thermal power station in Nagan Raya and bacteria *bacillus subtilis* which act as a self-healing agent. The procedure for geopolymer mortar binder refers to the conventional procedure. The method used for testing UPV refers to the standard ASTM C 597-02 IDT. The research was conducted on three types of concentration of NaOH that is 4M, 10M and 16M, with a mixing ratio of NaOH / Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> = 2.5. Variations of bacillus subtilis and calcium lactate is 1% + 2%; 1.5% + 3% and 2% + 4%. Specimens used were mortar cube measuring 10 cm x 10 cm x 10 cm with the number of test objects as much as 48 pieces, the test is done at 14, 21 and 28 days. Measurement of pH lye and pH mortar done to see the acidity level of NaOH solution. The measurement results show the lowest value is at pH of 11.71 and the highest value at pH of 12.61. So it can be concluded that these bacteria are able to survive at 3 types of NaOH concentrations. The results of the test showed that increasing UPV mortar age cause the higher the growth of bacteria in covering the cracks. But the opposite occurs in the value of the UPV which increasing the proportion of bacterial content will decreases the growth of bacteria in the cracks, the optimum value of the proportion of bacterial growth is 38.45%.

**Keywords**— Cracking, Geopolymer, *Bacillus Subtilis* bacteria, pH, UPV

## I. PENDAHULUAN

Keretakan pada permukaan beton merupakan masalah besar yang memerlukan tidak sedikit biaya perbaikan. Apalagi jika keretakan tersebut berada pada lokasi yang sulit dijangkau, atau bahkan pada titik yang lepas dari pengamatan seperti di bawah permukaan air dan tanah. Jika tidak segera ditanggulangi, keretakan akan menimbulkan kerusakan selanjutnya pada tulang besi yang menjadi semakin korosif [1].

Dengan pengembangan mikroorganisme yang ditanamkan pada beton, keretakan akan segera tertanggulangi dengan sendirinya. Mikroorganisme tersebut dapat memproduksi kristal kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) yang dengan segera menutupi rongga-rongga keretakan. Dengan keberadaan kalsium dan karbon dioksida memungkinkan mikroorganisme menghasilkan kalsium karbonat (Tziviloglou dkk., 2016). Bakteri melepaskan oksigen dan menyerap karbon dioksida. Di antara mikroorganisme yang telah

dikembangkan adalah bakteri *Bacillus pseudofirmus* dan *Bacillus halodurans* yang dapat bertahan pada pH larutan alkali dan dapat membentuk spora yang bertahan lama. Jika mendapati lingkungan yang tidak cocok, mikroorganisme ini akan menjadi spora atau mati suri dan akan hidup lagi pada kondisi yang sesuai. Rangsangan yang efektif untuk membuat mikroba tersebut hidup lagi adalah udara dan air [2].

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 [3].

Beton geopolimer merupakan salah satu inovasi dalam menggantikan beton konvensional, dikarenakan memiliki

beberapa keunggulan, yakni: lebih ramah lingkungan (dalam proses pembuatannya tanpa melepas emisi CO<sub>2</sub> ke atmosfer), tingkat workabilitas yang tinggi (mudah mengalir atau *self leveling*), lebih tahan terhadap serangan kimia (sulfat, asam, dan klorida), dan lebih tahan terhadap temperatur tinggi [4]. Namun geopolimer memiliki karakteristik yang sangat getas sehingga mudah terjadi retakan pada permukaannya. Tidak sama seperti beton konvensional yang terbentuk dari reaksi hidrasi, geopolimer terbentuk dari proses reaksi kimia dan sangat alkalis (basa) sehingga untuk proses *self healing* perlu diketahui akan kemampuan bertahan hidup (viabilitas) dari *self-healing agent* yang digunakan.

*Bacillus* merupakan bakteri gram positif, berbentuk batang, beberapa spesies bersifat aerob obligat dan bersifat anaerobik fakultatif, dan memiliki endospora sebagai struktur bertahan saat kondisi lingkungan tidak mendukung [5].

TABEL I  
KARAKTERISTIK *BACILLUS SUBTILIS*

Karakteristik	<i>Bacillus Subtilis</i>
Bentuk	Batang (tebal maupun tipis), rantai maupun tunggal
Gram	Positif
Sumber	Tanah, air, udara, materi tumbuhan yang terdekomposisi
Berdasarkan Spora	Bakteri penghasil endospore
Respirasi	Aerob oblig
Pergerakan	Motif dan adanya flagella
Katalasi	Positif

Sumber: Backman, dkk (1994)

Media merupakan suatu tempat yang digunakan untuk perkembangbiakan mikroorganisme. Media biakan yang digunakan untuk menumbuhkan bakteri terdapat dalam bentuk padat, semi padat dan cair. Media padat diperoleh dengan menambahkan agar. Agar berasal dari ganggang merah, agar digunakan sebagai bahan pematid karena tidak diuraikan oleh mikroorganisme, dan membeku pada suhu diatas 45°C kandungan agar sebagai bahan pematid dalam media adalah 1,5-2% [6].

Bahan dasar geopolimer umumnya mengandung silika dan alumina cukup tinggi, memiliki fasa amorphous reaktif atau fasa butiran-halus [7]. Berbagai bahan dasar digunakan dalam penelitian seperti *fly ash* kelas F, *fly ash* kelas C, metakaolin, dan slag. Aktivator yang digunakan dalam geopolimerisasi dapat berupa Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH, kombinasi NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, kombinasi KOH dan NaOH, KOH, potassium silika dan kombinasinya, serta natrium karbonat.

*Fly ash* merupakan salah satu bahan pozzolan yang berasal dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang terbang melekat pada sisi-sisi cerobong asap. Dikategorikan sebagai bahan pozzolan karena memiliki kandungan oksida: silika dan alumina yang kadarnya dominan lebih tinggi dari oksida lainnya.

*Fly ash* digolongkan menjadi dua katagori, yaitu: *low calcium fly ash* (CaO < 10%) dan *high calcium fly ash* (CaO > 10%). Dalam geopolimer, penggunaan *low calcium fly ash* memiliki waktu setting time 6 (enam) kali lebih lambat dari pada *high calcium fly ash*. Hal ini disebabkan *high calcium fly ash* memiliki sifat sebagai pozzolan sekaligus bahan bersifat semen (*cementitious*), sedangkan *low calcium fly ash* hanya

memiliki sifat pozzolan saja [8]. *High calcium fly ash* yang memiliki kandungan CaO > 15% dapat mereduksi kebutuhan semen portland hingga 40%. Nilai tersebut lebih besar daripada *low calcium fly ash* yang hanya mampu mereduksi 20-30% [9].



Gambar 1. Fly Ash dari PLTU Nagan Raya

TABEL II  
INDIKASI GETARAN MOLEKULER DARI AREA PUNCAK DI FLY ASH

Lokasi Puncak (cm <sup>-1</sup> )	Jenis Ikatan
3690 O-H	peregangan dalam Ca(OH) <sup>2</sup>
3440-3460	Peregangan OH dan H-O-H
1640-1660	Deformasi OH dan H-O-H
1450	O-C-O peregangan dalam karbonat
980-1040	Peregangan Si-O-Si dan Al-O-Si
450-470	Tekuk Si-O-Si

Sumber: E. G. Sogaard, dkk (2016)

TABEL III  
KUALITAS BETON BERDASARKAN UPV TEST

Kecepatan Gelombang Longitudinal (km/dt)	Kualitas Beton
> 4,5	Sangat Baik
3,5 – 4,5	Bagus
3,0 – 3,5	Diragukan
2,0 – 3,0	Jelek
< 2,0	Sangat Jelek

Sumber: International Atomic Energy Agency, Vienna (2002)

## II. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Bahan dan Material

- *Fly Ash*

Dalam pembuatan mortar geopolimer material dasar yang digunakan adalah *fly ash* yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Nagan Raya.

- *Bakteri Bacillus Subtilis*

Bakteri yang difungsikan sebagai *self-healing agent* pada penelitian ini berupa bakteri *Bacillus Subtilis* yang perkembangbiakannya dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Fakultas Farmasi Universitas Sumatera Utara dengan proses penanaman bakteri pada medium cair berupa *nutrient agar* dengan jumlah koloni bakteri sebesar 10<sup>6</sup> Spora/ml. Sebelum digunakan bakteri tersebut akan dimati surikan dengan cara disimpan dalam *refrigerator* yang bertujuan untuk menjaga kestabilan struktur bakteri sebelum dicampurkan ke dalam mortar geopolimer.

- *Kalsium Laktat*

Kalsium laktat yang digunakan dalam penelitian ini bersifat *food grade*, yang aman digunakan dan dibeli dari

toko bahan kimia CV. Rundang Jaya Medan.

- *Natrium Hidroksida (NaOH)*

Natrium hidroksida berfungsi sebagai aktivator dalam reaksi polimerisasi *fly ash*. Natrium hidroksida yang dibeli dari toko bahan kimia dan dijual di pasaran berupa serpihan (flake), oleh karena itu harus dijadikan larutan terlebih dahulu dengan molaritas 4M, 10M, dan 16M. Larutan akan dibuat sehari sebelum pemakaian dan didiamkan minimal selama 24 jam.

- *Natrium Silika (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)*

Natrium silika yang digunakan adalah berupa larutan kental siap pakai atau biasa disebut dengan *waterglass*, yang dibeli dari toko bahan kimia CV. Rundang Jaya Medan.

- *Agregat Halus*

Agregat halus yang akan digunakan berupa pasir alami, yang berasal dari Krueng Mane, Kabupaten Aceh Utara.

### B. Karakteristik Material dan Mikrostruktur Pasta

Pengujian karakteristik material dan mikrostruktur pengikat geopolimer dalam penelitian ini dilakukan terhadap material *fly ash* serta pasta geopolimer. Adapun pengujian yang menggunakan alat *X-Ray Fluorescence (XRF)* terhadap material *fly ash*, sedangkan pengujian menggunakan alat *X-Ray Diffraction (XRD)*, *Thermo Gravimetri Analysis (TGA)*, dan *Fourier Transform Infrared (FTIR)* dilakukan terhadap material *fly ash* dan mikrostruktur pengikat geopolimer.

### C. Perancangan Campuran Benda Uji

Perancangan campuran benda uji bertujuan untuk menghitung proporsi material-material penyusun mortar geopolimer. Perancangan campuran didasari dari ukuran dan jumlah benda uji yang diperlukan. Adapun konsentrasi larutan NaOH yang digunakan adalah 4 mol, 10 mol dan 16 mol.

Sedangkan yang akan menjadi variabel dalam penelitian ini adalah jumlah bakteri *Bacillus Subtilis* yang dicampur dengan *nutrient agar* dan kalsium laktat sebagai sumber nutrisinya dan dicampurkan langsung kedalam adukan mortar geopolimer (non-encapsuling), dengan variasi jumlah bakteri+kalsium laktat adalah 0 gr Bakteri + 0 gr Ca; 17 gr Bakteri + 34 gr Ca; 20.50 gr Bakteri + 51 gr Ca; dan 34 gr Bakteri + 68 gr Ca. Untuk rincian jumlah kebutuhan material benda uji yang akan dibuat pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

TABEL IV  
RINCIAN JUMLAH PEMBUATAN BENDA UJI

Mix	Material (gram)		Larutan Alkali/FA	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	NaOH		Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (gram)	Alkaline Solution (gram)	Bakteri Basillus Laktat (gram)	Kalsium Laktat (gram)
	Pasir	FA			(mol)	(gram)				
M1	1133	567				178,10	445,24	623,33	0,00	0,00
M2	1133	567			4	178,10	445,24	623,33	17,00	34,00
M3	1133	567	1,1	2,5		178,10	445,24	623,33	25,50	51,00
M4	1133	567				178,10	445,24	623,33	34,00	68,00
M5	1133	567				178,10	445,24	623,33	0,00	0,00
M6	1133	567			10	178,10	445,24	623,33	17,00	34,00
M7	1133	567	1,1	2,5		178,10	445,24	623,33	25,50	51,00
M8	1133	567				178,10	445,24	623,33	34,00	68,00
M9	1133	567				178,10	445,24	623,33	0,00	0,00
M10	1133	567			16	178,10	445,24	623,33	17,00	34,00
M11	1133	567	1,1	2,5		178,10	445,24	623,33	25,50	51,00
M12	1133	567				178,10	445,24	623,33	34,00	68,00

### D. Pembuatan Benda Uji

Setelah perancangan campuran maka dilakukan pembuatan benda uji, dalam penelitian ini digunakan benda uji kubus

dengan panjang 10 cm, lebar 10 cm dan tinggi 10 cm. Adapun benda uji dibuat 4 buah untuk setiap variasi dengan jumlah keseluruhan benda uji berjumlah 48 buah. Pengujian pH mortar dan UPV dilakukan pada umur 14 hari, 21 hari dan 28 hari. Untuk rincian jumlah benda uji yang dibuat pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

TABEL V  
RINCIAN JUMLAH BENDA UJI

Mix	Umur Pengujian (hari)			Total Sampel
	14	21	28	
M1		4		4
M2		4		4
M3		4		4
M4		4		4
M5		4		4
M6		4		4
M7		4		4
M8		4		4
M9		4		4
M10		4		4
M11		4		4
M12		4		4
Total Sampel				48

### E. Perawatan Benda Uji

Perawatan benda uji dilakukan dengan meletakkan benda uji mortar geopolimer pada suhu ruang. Setelah benda uji berumur 14 hari selanjutnya akan diberi beban sebesar 50% dari beban maksimum agar timbul retakan dengan menggunakan alat uji tekan merk Matest.

### F. Mengukur pH Larutan Alkali Aktivator

Pengukuran nilai pH akan dilakukan untuk setiap campuran alkali aktivator dengan konsentrasi NaOH yang berbeda yaitu 4 mol, 10 mol, dan 16 mol. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat pH meter merk HandyLab pH11 dengan takaran pengukuran pH-Fix 0-14 ke dalam larutan alkali aktivator.

### G. Mengukur pH Mortar Geopolimer

Pengukuran nilai pH mortar geopolimer dilakukan saat mortar berumur 14 hari, 21 hari dan 28 hari. Pengukuran dilakukan dengan cara menghaluskan serpihan mortar sebanyak 15 gram dan dicampurkan ke dalam aquadest sebanyak 15 ml selanjutnya diaduk selama 1-2 menit dan setelah didiamkan dalam suhu ruang selama 24 jam, dilakukan pengukuran pH dengan menggunakan alat pH meter merk HandyLab pH11 dengan takaran pengukuran pH-Fix 0-14.

### H. Mengukur Uji Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Pengujian UPV dilakukan pada mortar umur 14 hari, 21 hari dan 28 hari, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri *Bacillus Subtilis* menutup retakan pada mortar geopolimer. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM C 597-02 IDT dengan menggunakan alat Portable Unit Non Destruction Indicator Tester (PUNDIT) merk Proceq.

### I. Mikroskop Digital

Pengujian menggunakan alat mikroskop digital dilakukan untuk mengamati keretakan pada permukaan mortar geopolimer. Pengamatan dilakukan pada mortar geopolimer tanpa campuran bakteri *Bacillus Subtilis* dan mortar geopolimer dengan campuran bakteri *Bacillus Subtilis* dan

kalsium laktat yang dipilih berdasarkan hasil dari pengujian *ultrasonic pulse velocity test* (UPV).

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Pengujian Sifat Fisis Material Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari pasir Krueng Mane, Kabupaten Aceh Utara dengan ukuran < 4.75 mm. Hasil observasi dari pengujian sifat fisis dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

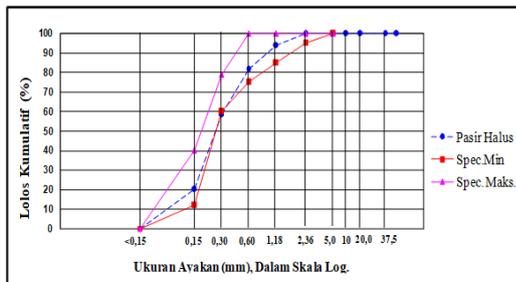
TABEL VI  
HASIL PENGUJIAN SIFAT FISIS AGREGAT HALUS

No.	Jenis Pengujian	Hasil Analisa Rata – rata	Standar ASTM	Satuan	ASTM
1	Berat volume	1541.01	> 1445	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM C.29-1991
2	Berat jenis (SSD)	2,555	1,6 – 3,2	Kg/m <sup>3</sup>	ASTM C.128-15
3	Fine modulus	2,46	2.3 – 3.1	-	ASTM C33-01
4	Absorption	3,101	Max 12 %	%	ASTM C.128-15
5	Kandungan air	1.42	Max 10 %	%	ASTM C.566-13
6	Kadar lumpur	2.02	5 %	%	ASTM C.117-13
7	Kadar organik	Kuning muda	Standart color chart organic impurities	-	ASTM C.40-92

Berdasarkan Tabel 6 menunjukkan hasil pengujian sifat-sifat fisis agregat halus semuanya memenuhi ketentuan yang disyaratkan ASTM C 33-01. Selanjutnya untuk hasil pemeriksaan terhadap analisa saringan pada agregat halus dapat dilihat pada Tabel 7 berikut.

TABEL VII  
ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS

Ukuran Ayakan (mm)	Tertahan		Kumulatif		SPEK. BS 882-92 ZONA-3(Agak Hls)	
	Berat (gr)	Persen (%)	Tertahan (%)	Lolos (%)	Min.	Maks.
	Rata-Rata					
5,00	0,0	0,00	0,00	100,00	95	100
2,36	30,6	6,13	6,13	93,87	85	100
1,18	60,7	12,13	18,26	81,74	75	100
0,60	115,6	23,12	41,38	58,62	60	79
0,30	193,1	38,62	80,00	20,00	12	40
0,075	100,0	20,00	100,00	0,00	0	0
<b>Jumlah</b>	<b>500,0</b>		<b>245,76</b>			
<b>FM</b>			<b>2,46</b>			



Gambar 2. Kurva Gradasi Agregat

Tabel 7 menunjukkan hasil analisa saringan agregat halus, yang masuk dalam zona 3 yaitu dengan kondisi pasir agak halus. Dengan memperoleh data modulus kehalusan agregat halus 2.46 yang telah memenuhi persyaratan ASTM C33-01.

#### B. Pengujian Karakteristik Material dan Mikrostruktur Pasta

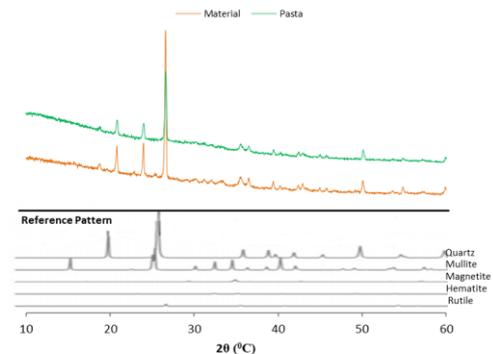
##### • Komposisi Kimia Material

Hasil pengujian *X-ray fluorescence* (XRF) pada *fly ash* Nagan Raya memiliki kandungan utama yaitu Si, Al dan Ca dengan masing-masing memiliki nilai kandungan sebesar 37,16%, 17,61% dan 8,72%. Kandungan kimia ini berperan membentuk gel polimerisasi. Senyawa Si dan Al dikategorikan dalam senyawa kaya yang menghasilkan gel kuat Si-O-Si dan Si-O-Al dalam pasta. Gel ini mampu meningkatkan sifat mekanik seperti kuat tekan, kuat lentur dan kuat tarik. Untuk komposisi kimia terhadap material *Fly ash* Nagan Raya yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 8 Persentase komposisi kimia dari *fly ash* sebagai berikut.

TABEL VIII  
PERSENTASE KOMPOSISI KIMIA DARI FLY ASH

Senyawa Kandungan	Persentase Kandungan (%)
Si	37,16
Al	17,61
Fe	18,79
Ca	8,72
Na	0,468
K	0,788
Ti	0,747
Mg	6,43
P	0,139
S	1,96

##### • Analisis Kristal Material dan Mikrostruktur Pasta

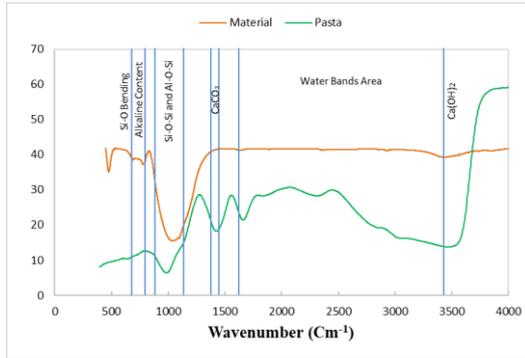


Gambar 3. Grafik XRD dari Material Fly Ash

Berdasarkan gambar 3 terlihat bahwa puncak utama dari material *fly ash* dan pasta geopolimer berada pada daerah 20 sampai 30 2θ yang menunjukkan bahwa material *fly ash* dan pasta geopolimer memiliki komposisi kimia utama pada *Quartz* (Si) sedangkan pada puncak-puncak yang kecil menunjukkan adanya senyawa kimia *Mullite* (Fe) dan *Magnetite* (Al). Hal yang sama terjadi pada pasta geopolimer yang menjelaskan bahwa material *fly ash* dapat dijadikan sebagai pasta dalam ikatan geopolimer, ini berarti material *fly ash* memiliki tingkat polimerisasi yang tinggi dalam membentuk pasta. Kandungan Si dan Al pada pasta geopolimer bereaksi dengan larutan alkali membentuk ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al yang berperan sebagai pengikat dalam sistem

polimerisasi yang berkontribusi terhadap sifat mekanik geopolimer.

• Identifikasi Ikatan Material dan Mikrostruktur Pasta



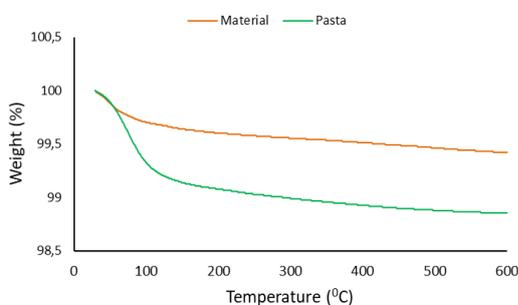
Gambar 4. Grafik FTIR Material Fly Ash

Gambar tersebut menunjukkan bahwa puncak pita pada daerah bilangan gelombang di bawah 680 cm<sup>-1</sup> menunjukkan pembengkokan Si-O. Terlihat pada Tabel 9 bahwa puncak pita pada pasta geopolimer sebanyak 2 buah sedangkan pada material fly ash sebanyak 1 buah. Ini menunjukkan bahwa puncak pita pada pasta geopolimer lebih banyak dari material fly ash. Hal ini disebabkan lebih banyak kandungan Si dalam material fly ash sehingga kandungan Si yang bersisa tidak mendapatkan porsi untuk bereaksi dengan kandungan Al.

TABEL IX  
JUMLAH PUNCAK PITA DARI MATERIAL FLY ASH DAN PASTA

Band Range (Cm <sup>-1</sup> )	Bonding Type Indication	Peak Band Number	
		Fly Ash Powder	Geopolimer Paste
Below 680	Bending of Si-O	1	2
680-800	Presence of Alkali Content	1	2
880-1140	Stretching of Si-O-Si and Si-O-Al	1	1
1380-1450	Stretching of CaCO <sub>3</sub> (Carbonate)	0	1
1630-3440	Stretching of H-O-H and Bending of H-O-H	3	5
Above 3440	Stretching of Ca(OH) <sub>2</sub>	1	1
<b>Total Peak Point</b>		<b>7</b>	<b>12</b>

• Analisis Aliran Termal Material dan Mikrostruktur Pasta



Gambar 5. Penurunan Berat Material Fly Ash

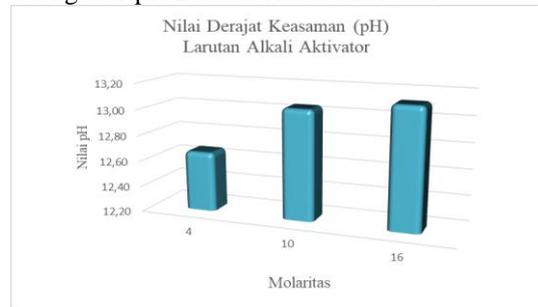
Penurunan berat material dan pasta geopolimer pada suhu 20<sup>o</sup>C hingga 100<sup>o</sup>C sebesar 0,3% dan 0,67%. Penurunan ini menunjukkan kondisi penguapan ikatan air secara fisik. Penurunan berat pada suhu 100<sup>o</sup>C hingga 300<sup>o</sup>C sebesar 0,15% dan 0,34%. Penurunan ini menunjukkan kondisi penguapan ikatan air secara kimia. Penurunan berat pada suhu di atas 300<sup>o</sup>C sebesar 0,28% dan 0,47%. Penurunan ini menunjukkan dihidroksilasi

gugus OH yang terjadi dengan polikondensasi yang selanjutnya menjadi ikatan siloxo Si-O-Si dengan menghubungkan jaringan rantai geopolimer.

Tercatat pada penurunan berat di semua titik kalsinasi menunjukkan bahwa penurunan berat pasta geopolimer lebih tinggi daripada material fly ash. Hal ini dikaitkan dengan banyaknya larutan alkali dalam pasta yang menyebabkan lebih banyak penguapan air. Sedangkan material fly ash masih dalam kondisi kering.

C. Pengukuran Derajat Keasaman (pH)

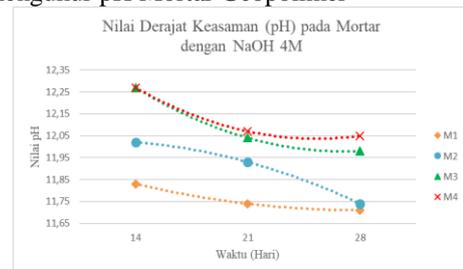
• Mengukur pH Larutan Alkali Aktivator



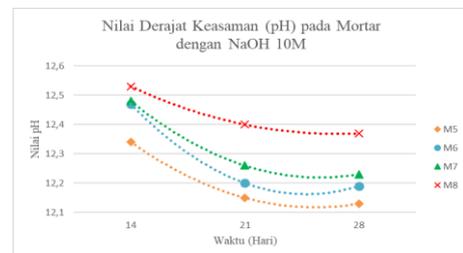
Gambar 6. Hasil Pengukuran pH Larutan Alkali Aktivator

Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai derajat keasaman (pH) pada 3 jenis konsentrasi NaOH yang diteliti mengalami peningkatan terhadap nilai pH. Hal ini dikaitkan dengan semakin tinggi molaritas dari larutan NaOH maka semakin pekat konsentrasi NaOH tersebut.

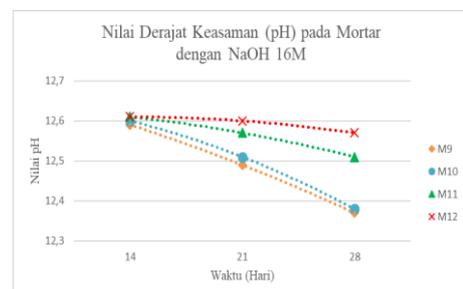
• Mengukur pH Mortar Geopolimer



Gambar 7. Nilai Derajat Keasaman (pH) Mortar pada 4M



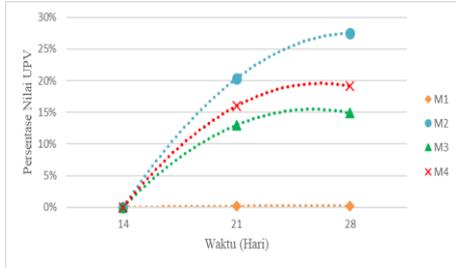
Gambar 8. Nilai Derajat Keasaman (pH) Mortar pada 10M



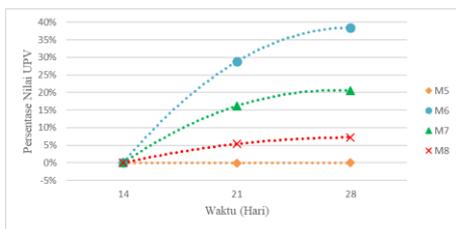
Gambar 9. Nilai Derajat Keasaman (pH) Mortar pada 16M

Berdasarkan Gambar 7, Gambar 8 dan Gambar 9 dapat disimpulkan bahwa nilai pH mortar akan mengalami peningkatan seiring bertambahnya variasi persentase bakteri yang terkandung di dalam mortar. Namun, seiring bertambahnya usia mortar maka nilai pH akan mengalami penurunan.

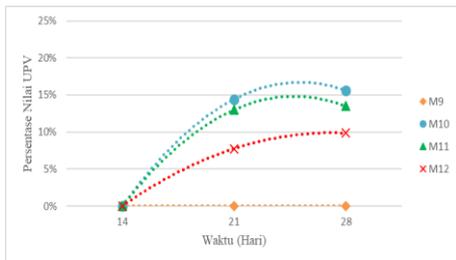
**D. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)**



Gambar 10. Nilai UPV Mortar pada NaOH Molaritas 4



Gambar 11. Nilai UPV Mortar pada NaOH Molaritas 10



Gambar 12. Nilai UPV Mortar pada NaOH Molaritas 16

Jika membandingkan nilai persentase pertumbuhan bakteri dalam mortar pada NaOH 4 mol, 10 mol dan 16 mol terlihat bahwa persentase pertumbuhan bakteri dalam menutupi retakan tertinggi terjadi pada NaOH molaritas 10. Hal ini dikarenakan NaOH dengan molaritas 10 memiliki tingkat keasam-basaan (pH) yang sesuai dengan lingkungan yang dibutuhkan oleh bakteri *Bacillus subtilis* dalam proses berkembang biak.

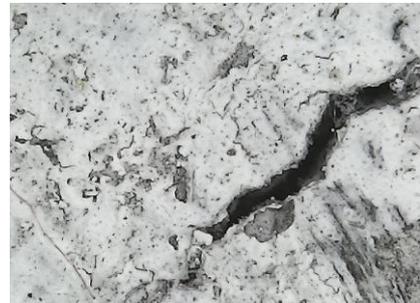
Berdasarkan Gambar 10, Gambar 11 dan Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa nilai pengujian UPV akan mengalami penurunan yang berarti persentase pertumbuhan bakteri dalam menutupi retakan pada mortar mengalami peningkatan seiring bertambahnya usia mortar. Dengan demikian, persentase optimum pertumbuhan bakteri *Bacillus Subtilis* dari 3 jenis konsentrasi NaOH yang berbeda terdapat pada mix 6 pada NaOH molaritas 10 dengan nilai sebesar 38,45%.

**E. Digital Image**

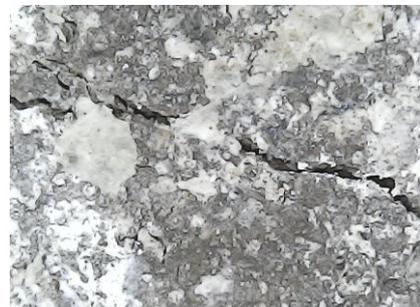
Berdasarkan hasil pengujian (UPV) yang menunjukkan persentase optimum pertumbuhan bakteri dalam menutupi keretakan pada mortar terdapat pada mix 6 dengan NaOH molaritas 10 yaitu sebesar 38,45%. Hasil pengamatan keretakan pada permukaan mortar dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 13. Permukaan Mortar tanpa Bakteri pada umur 14 hari



Gambar 14. Permukaan Mortar tanpa Bakteri pada Umur 30 Hari



Gambar 15. Permukaan Mortar Optimum Pengujian UPV pada Umur 14 Hari



Gambar 16. Permukaan Mortar Optimum Pengujian UPV pada Umur 30 Hari

Berdasarkan pengujian UPV yang telah dilakukan sebelumnya dimana mortar diberi beban tekan sebesar 50% dari beban maksimum yang mampu diterima oleh mortar pada umur 14 hari, yang berarti pada umur mortar 14 hari baru dimulainya pertumbuhan bakteri *Bacillus Subtilis* dalam menutupi keretakan pada mortar. Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan alat mikroskop digital terlihat bahwa keretakan pada permukaan mortar tanpa campuran bakteri di umur 14 hari (Gambar 13) dan umur 30 hari (Gambar 14) terlihat sama dimana ukuran keretakan pada mortar tidak mengalami perubahan. Sedangkan, pada

permukaan mortar dengan NaOH molaritas 10 yang mengandung bakteri dan kalsium laktat sebesar 17 gr + 34 gr dari hasil pengamatan terlihat bahwa pada umur 30 hari (Gambar 16) bakteri *Bacillus Subtilis* berhasil hidup dan menutupi keretakan pada mortar dengan nutrisi kalsium laktat yang terkandung di dalam senyawa mortar geopolimer, sehingga bakteri *Bacillus Subtilis* menghasilkan enzim berbentuk putih yang senyawa dasarnya hampir sama dengan senyawa kapur seperti yang dapat dilihat pada Gambar 16.

#### IV. KESIMPULAN

Bakteri *Bacillus Subtilis* mampu bertahan hidup pada 3 jenis konsentrasi NaOH yaitu 4 mol, 10 mol, dan 16 mol. Nilai dekarat keasaman (pH) pada mortar geopolimer menunjukkan semakin tinggi konsentrasi NaOH maka semakin tinggi nilai pH mortar, pada 4 mol nilai pH mortar terendah berada pada pH 11,71 sedangkan nilai pH tertinggi berada pada pH 12,27, pada 10 mol nilai pH mortar terendah berada pada pH 12,13 sedangkan nilai pH tertinggi berada pada pH 12,53, dan pada 16 mol nilai pH mortar terendah berada pada pH 12,37 sedangkan nilai pH tertinggi berada pada pH 12,61.

Berdasarkan pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity test* (UPV) yang dilakukan pada 3 jenis konsentrasi NaOH dan 3 jenis variasi bakteri *Bacillus Subtilis* + kalsium laktat, dapat dilihat hasil berupa pada konsentrasi NaOH molaritas 4, 10 dan 16 semakin bertambahnya umur mortar maka semakin tinggi persentase pertumbuhan bakteri dalam menutupi retakan pada mortar. Tetapi hal sebaliknya terjadi pada nilai UPV yang mana semakin bertambahnya persentase kandungan bakteri di dalam mortar maka semakin menurun pula persentase pertumbuhan bakteri dalam mortar. Maka dapat disimpulkan

bahwa persentase optimum pertumbuhan bakteri dari 3 jenis konsentrasi NaOH yang berbeda terdapat pada mix 6 dengan variasi 1% bakteri *b.subtilis* dan 2% kalsium laktat dengan nilai konsentrasi NaOH molaritas 10 didapat nilai persentase pertumbuhan bakteri dalam menutupi retakan adalah sebesar 38,45%.

#### REFERENSI

- [1] Ikons. (2017, 12 Maret). Menanggulangi Keretakan Beton dengan Bakteri. Diakses pada 13 November 2020, dari <https://www.ikons.id/menanggulangi-keretakan-beton-dengan-bakteri>
- [2] Rochani, I.; Prasetyo, A.; & Kurniawan, A., 2016, "Pemanfaatan Batu Apung (*Pumice*) sebagai Agent Perbaikan Kerusakan Retak pada Beton", *Majalah Geografi Indonesia*, Vol. 30 No. 1, hlm. 49-57.
- [3] Kim, D.; Lai, HT; Chilingar, GV; Yen TF (2006). Pembentukan geopolimer dan sifat-sifatnya yang unik, *Environ. Geol*, 51 [1], 103-111
- [4] Abdullah, M. M., Razak, R. A., Yahya, Z., Hussin, K., Ming, L. Y., Yong, H. C., et al. (2013). *Asas Geopolimer (Teori & Amali)* (1st ed.). Perlis: Unit Penerbitan Universiti Malaysia Perlis.
- [5] Backman P.A., Brannnen P.M dan Mahaffe W.F. 1994. *Plant Respon and Disease Control Following Seed Inoculation with Bacillus sp.* Di dalam: Ryder MH, Stephen PM, Bowen GD, editor. Improving Plant Production with Rhizosphere Bacteria. Australia: Pruc Third Int Work PGPR South Australia.
- [6] Lay, W.B. 1994. *Analisa Mikroba di Laboratorium*. Edisi I. Jakarta : PT.Raja Grafindo Persada.
- [7] Perera, D. 2007. Geopolymers-low energy and environmentally sound materials. Proceedings of the 1st International Congress on Ceramics. Freiman, S. (ed). The American Ceramic Society.
- [8] ASTM C618 (1994), *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan For Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylvania, Volume 04.02.
- [9] Abdul, Y.K. 2017. "Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash". . Fakultas Vokasi Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh November.