

Pengaruh Penggunaan Bakteri *Bacillus Subtilis* terhadap Kinerja Mortar yang Terpapar Sulfat

Faisal Rizal¹, Aiyub², Hanif³, Chairil Anwar⁴

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

¹faisalrizal@pnl.ac.id

Abstrak— Beton merupakan bahan material yang paling banyak digunakan dalam industri konstruksi untuk membuat bangunan, jembatan, dan jenis struktur lainnya. Selain beton, dalam konstruksi bangunan dikenal dengan istilah mortar. Mortar ini berfungsi sebagai matrik pengikat atau bahan pengisi bagian penyusun suatu konstruksi baik yang bersifat struktural maupun non-struktural. Beton dan mortar sering mengalami pelapukan di lingkungan yang agresif. Hal ini dikarenakan tingginya kandungan klorida, sulfat dan derajat keasaman pada lingkungan agresif sehingga beton dan mortar rentan mengalami kerusakan. Lingkungan sulfat menyebabkan pembesaran pada pori-pori beton dan mortar, sulfat yang menyerang beton dan mortar dapat berasal dari berbagai sumber seperti air tanah, air laut maupun dari limbah industri. Penanganan permasalahan keretakan pada mortar dan pori-pori yang membesar akibat terpapar sulfat semakin berkembang dan inovasi teknologinya pun berjalan sangat cepat, salah satunya inovasi dengan menggunakan *self-healing concrete*, yaitu mengaplikasikan suatu jenis spesies bakteri sebagai agen pemulihan diri secara mandiri dengan takaran cairan bakteri yang berbeda-beda. Penelitian ini dilakukan untuk menguji pengaruh bakteri *Bacillus Subtilis* terhadap sifat mekanis berupa kuat tekan, kuat lentur dan pengujian durabilitas berupa uji porositas dan UPV. Penelitian ini dilakukan dengan menambahkan 20%, 40%, 60% bakteri *Bacillus Subtilis* dengan konsentrasi spora 10^6 /ml ke dalam campuran mortar. Pengujian benda uji dilakukan pada umur 28 hari dan 56 hari. Variasi benda uji terdiri dari mortar normal dan mortar bakteri yang direndam dalam air biasa dan larutan sulfat. Penggunaan bakteri untuk memperbaiki keretakan dan pori-pori pada mortar, hal ini terlihat bahwa peningkatan optimum pada persentase bakteri 20%, dimana terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 7,81%, kuat lentur sebesar 14,52%, UPV sebesar 1,84%, dan penurunan porositas sebesar 4,47% pada umur 56 hari jika direndam dengan air biasa. Namun pada mortar yang direndam dilingkungan agresif (larutan sulfat) ketahanan mortar biasa dan bakteri mengalami penurunan, terjadinya penurunan kuat tekan, kuat lentur, UPV dan peningkatan porositas.

Kata kunci— *Bacillus Subtilis*, Kuat Lentur, Kuat Tekan, Porositas, UPV, Lingkungan Sulfat.

Abstract— Concrete is the most widely used material in the construction industry to make buildings, bridges, and other types of structures. In addition to concrete in building construction, there is a term known as mortar. This mortar serves as a binding matrix or filling material for the constituent parts of construction, both structural and non-structural. Concrete and mortar often got corrosion in aggressive environments. This is due to the high content of chloride, sulfate, and acidity in an aggressive environment so that concrete and mortar are susceptible to damage. The sulfate environment causes enlargement of the pores in concrete and mortar, sulfates that attack concrete and mortar can come from various sources such as groundwater, seawater, or industrial waste. Solving the problem of cracks and enlarged pores in mortar due to exposure to sulfate is growing and technological innovations are also becoming advanced, which is the innovation by using self-healing concrete, that is applying a type of bacterial species as an agent for self-recovery independently with a varying dose of bacterial liquid. This research was conducted to examine the effect of *Bacillus Subtilis* bacteria on mechanical properties in the form of compressive strength, flexural strength, and durability tests in the form of porosity and UPV tests. This research was conducted by adding 20%, 40%, 60% of *Bacillus Subtilis* bacteria with a spore concentration of 10^6 /ml into the mortar mixture. The test of the objects was done at the age of 28 days and 56 days. Variations of test objects consisted of normal mortar and bacterial mortar immersed in plain water and sulfate solution. The use of bacteria to repair cracks and pores in the mortar can be seen that the optimum increase at the percentage of bacteria in 20%, there is a sign of an increase in compressive strength of 7.81%, the flexural strength of 14.52%, UPV of 1.84%, and a decrease in porosity of 4.47% at the age of 56 days when soaked in plain water. However, the mortar that was immersed in an aggressive environment (sulfate solution) caused the resistance of ordinary mortar and bacteria got decrease, compressive strength decreased, flexural strength, UPV, and increased porosity.

Keywords— *Bacillus Subtilis*, Flexural strength, Compressive strength, Porosity, UPV, Sulfate Environment.

I. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan material yang paling banyak digunakan dalam industri konstruksi untuk membuat bangunan, jembatan, dan jenis struktur lainnya. Keunggulan beton diantaranya memiliki kuat tekan yang tinggi dan tahan terhadap suhu yang tinggi, mudah dibentuk sesuai kebutuhan struktur bangunan, dan biaya perawatan rendah.

Selain beton, dalam konstruksi bangunan dikenal dengan istilah mortar. Fungsi dari mortar ini tidak lain sebagai matrik pengikat atau bahan pengisi bagian penyusun suatu konstruksi baik yang bersifat struktural maupun non-struktural. Contoh penggunaan mortar untuk konstruksi bersifat struktural ialah pasangan batu belah untuk pondasi sedangkan non struktural ialah untuk merekatkan pasangan bata untuk dinding [1].

Beton dan mortar di lingkungan agresif sering mengalami pelapukan, kandungan klorida, sulfat dan derajat keasaman yang tinggi pada lingkungan agresif, hal ini membuat beton dan mortar rentan mengalami kerusakan. Mulai dari kerusakan ringan berupa retak-retak sampai kehancuran akibat korosi yang terlalu parah pada konstruksi. Lingkungan sulfat menyebabkan pembesaran pada pori-pori pada beton dan mortar, sulfat yang menyerang beton dan mortar dapat berasal dari berbagai sumber seperti air tanah, air laut maupun dari limbah industri.

Penanganan permasalahan keretakan pada beton dan pori-pori yang membesar akibat pengaruh lingkungan sulfat semakin berkembang dan inovasi teknologinya pun berjalan sangat cepat, salah satunya inovasi dengan menggunakan *self-healing concrete*, yaitu mengaplikasikan suatu jenis spesies

bakteri sebagai agen pemulihan diri secara mandiri dengan takaran cairan bakteri berbeda-beda.

Pemilihan bakteri sebagai agen penyembuhan keretakan pada beton, telah diusulkan sebagai alternatif untuk mengembangkan sistem bahan *cementitious* yang dapat menyembuhkan diri sendiri [2]. Bakteri dapat membentuk spora yang tidak aktif di lingkungan yang ekstrim dari bahan yang mengandung semen, ketika beton retak, spora yang tidak aktif dapat diaktifkan oleh air dan udara yang masuk melalui celah tersebut [2].

Untuk mengatasi permasalahan adanya keretakan mikro dan pembesaran pori-pori pada beton dan mortar yang terpapar sulfat dapat mengakibatkan terjadinya penurunan nilai sifat mekanis dan durabilitas beton dan mortar perlu dilakukan inovasi untuk mengembangkan bahan *cementitious* yang dapat menyembuhkan diri sendiri dan meningkatkan sifat mekanis serta durabilitas beton. Oleh karena itu, peneliti mencoba untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh penggunaan media bakteri *Bacillus subtilis* terhadap sifat mekanis dan durabilitas spesimen mortar di lingkungan sulfat.

Bakteri adalah suatu organisme yang mampu melakukan penyebaran terluas di alam. *Bacillus Subtilis* merupakan bakteri dengan golongan mesofil, yaitu spesies yang mampu hidup dan tumbuh pada suhu 10°C - 47°C [3]. *Bacillus Subtilis* juga telah berevolusi sehingga dapat hidup walaupun dibawah kondisi keras dan lebih cepat mendapatkan perlindungan terhadap situasi seperti kondisi pH rendah (asam) [4].

Bakteri *Bacillus Subtilis* termasuk bakteri golongan aerobik dimana mampu tumbuh dengan adanya udara dan dapat diaktifkan oleh air [5]. Bakteri *Bacillus Subtilis* memiliki beberapa keunggulan yaitu mampu membentuk *endospore* protektif ini terbentuk saat terjadi tekanan pada bakteri sehingga dapat memungkinkan bertahan pada kondisi yang ekstrim [6].

Proses semen dengan mikroba berkolaborasi yaitu saat bakteri itu cocok dengan lingkungan sesuai seperti air maka akan menghasilkan amonia. Reaksi biologi yang terjadi adalah bakteri CO₂ berkolaborasi dengan *portlandite* [Ca(OH)₂] di dalam beton sehingga menghasilkan CaCO₃ (kalsium karbonat).

TABEL I
KARAKTERISTIK *BACILLUS SUBTILIS*

Karakter	<i>Bacillus Subtilis</i>
Bentuk	Batang (tebal maupun tipis), rantai maupun tunggal
Gram	Positif
Sumber	Tanah, air, udara dan materi tumbuhan yang terdekomposisi
Berdasarkan spora	Bakteri penghasil endspora
Respirasi	Aerob obligat
Pergerakan	Motif dengan adanya flagella
Suhu Pertumbuhan	Optimum 25-35 °C
pH Pertumbuhan	Optimum 7- 8
Katalase	Positif

Sumber: Graumann [21]

Bakteri basilus dikembangkan menggunakan proses larutan *Nutrient*, dimana campuran *nutrient* sendiri menggunakan 99,3% aquades yang berat jenisnya sama dengan air yaitu 1000 kg/m³, sehingga jika ingin menggunakan bakteri ini

sebagai campuran pada saat pembuatan beton atau mortar bisa langsung disubstitusikan dengan air [7].

Media adalah suatu bahan yang terdiri dari campuran zat-zat hara (*nutrient*) yang digunakan untuk membiakkan mikroba. Media terdapat bermacam-macam yang dapat digunakan untuk isolasi, perbanyakan, pengujian sifat-sifat fisiologis dan perhitungan jumlah mikroba [8]. Mikroorganisme memanfaatkan nutrisi media berupa molekul-molekul kecil yang dirakit untuk menyusun komponen sel. Dalam pemeriksaan mikrobiologi, media menjadi suatu hal yang penting agar mikroba yang dapat hidup.

Mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (tanah liat, kapur, semen Portland) dan air dengan komposisi tertentu (SNI-03-6825-2002). Fungsi utama mortar adalah menambah lekatan dan ketahanan ikatan dengan bagian-bagian penyusun suatu konstruksi. Kekuatan mortar tergantung pada kohesi pasta semen terhadap partikel agregat halusnya. Campuran mortar akan menghasilkan sifat-sifat mekanik pada mortar. Sifat mekanik mortar dapat mempresentasikan kualitas atau mutu dari mortar. Sifat-sifat mekanis mortar semen terdiri dari kuat tekan dan kuat lentur.

Kekuatan tekan mortar semen adalah gaya maksimum per satuan luas yang bekerja pada benda uji mortar semen berbentuk kubus dengan ukuran tertentu serta berumur tertentu (SNI-03-6825-2002). Selanjutnya, Mulyono (2006) mengemukakan bahwa kuat tekan beton mengidentifikasi mutu sebuah struktur di mana semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, maka semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan.

Berdasarkan SNI 4154:2014 tentang metode uji kekuatan lentur beton menggunakan balok sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang). Kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam *Mega Pascal* (MPa) gaya persatuan luas. Berikut penelitian yang sudah dilakukan mengenai kuat lentur pada beton dan mortar bakteri.

Durabilitas adalah kemampuan material atau struktur untuk menghadapi resiko kerusakan akibat lingkungan, reaksi kimia, gangguan fisik atau proses pengrusakan yang berarti selama masa layan sesuai dengan umur rencana tanpa ada kerusakan [9]. Durabilitas mortar merupakan kemampuan mortar bertahan seperti kondisi yang direncanakan tanpa terjadi korosi dalam jangka waktu yang telah direncanakan. Dalam hal ini perlu pembatasan nilai faktor air semen (fas) maupun pembatasan dosis minimum yang digunakan sesuai dengan kondisi lingkungan [1].

Lingkungan agresif, yaitu lingkungan yang banyak mengandung unsur-unsur garam sulfat, klorida atau asam lainnya. Lingkungan asam akan mempengaruhi sifat fisik dan mekanis beton, karena dapat menyebabkan terjadinya disintegrasi pada beton [10]. Serangan asam membuat pasta semen mengalami korosi, sehingga dapat menimbulkan ekspansi, retak dan kehancuran pada beton dan mortar [11]. Salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa beton di lingkungan asam adalah tipe semen [10].

Bakteri *Bacillus Subtilis* bisa digunakan sebagai media untuk penyembuhan keretakan pada beton dan mortar. Konsentrasi bakteri yang berbeda didalam beton akan berpengaruh terhadap durabilitas (ketahanan) beton. Bakteri

akan memproduksi batu kapur sehingga akan mengisi bagian yang retak pada saat terjadi keretakan [12]. Batu kapur tersebut akan mengeras pada retakan di permukaan beton, sehingga mengakibatkan penyumbatan dan menutupnya celah keretakan pada beton [5].

Porositas adalah besarnya persentase ruang-ruang kosong atau besarnya kadar pori yang terdapat pada mortar dan merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kekuatan mortar. Pori-pori pada mortar maupun beton biasanya berisi udara atau air yang saling berhubungan dan dinamakan kapiler beton. Kapiler beton akan tetap ada walaupun air yang digunakan telah menguap, sehingga kapiler ini mengurangi kepadatan beton yang dihasilkan. Dengan bertambahnya volume pori maka nilai porositas juga akan semakin meningkat [13].

Salah satu yang penyebabnya melebarnya pori-pori yaitu lingkungan sulfat, dimana reaksi kimia yang kompleks umumnya terjadi apabila beton maupun mortar berada di lingkungan asam. Asam akan melarutkan kalsium pada mortar dan memberikan efek negatif berupa peningkatan porositas dan penurunan kekuatan tekan [14].

Derajat keasaman digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau ke basaan yang dimiliki oleh suatu larutan. Nilai pH berkisar dari 0 hingga 14. Suatu larutan dikatakan netral apabila memiliki nilai pH=7. Nilai pH>7 menunjukkan larutan memiliki sifat basa, sedangkan nilai pH<7 menunjukkan keasaman.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Bahan dan Material

1) *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 10^6 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.

2) *Media* : Media adalah suatu bahan yaang terdiri dari campuran zat-zat hara (*nutrient*) yang digunakan untuk membiakkan mikroba

3) *Portland Composite Cement (PCC) merk semen padang* : Bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain.

4) *Air Tawar* : Air merupakan salah satu faktor penting, karena air bereaksi dengan semen akan menjadi pasta pengikat agregat.

5) *Agregat Halus* : Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat pemecah batu. Agregat ini berukuran 0,063 mm – 4,76 mm yang meliputi pasir kasar dan pasir halus. Untuk beton penahan radiasi, serbuk baja halus dan serbut besi pecah digunakan sebagai agregat halus [16].

B. Rancangan Percobaan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri *Bacillus Subtilis* untuk meningkatkan sifat mekanis dan durabilitas spesimen mortar di lingkungan sulfat. Pengujian yang akan dilakukan terhadap material dan mortar mencakup pengujian yang tertera pada Tabel II berikut.

TABEL II
JENIS-JENIS PENGUJIAN

No	Uraian	Jenis-jenis pengujian	Referensi
A	Sifat-Sifat Fisis Material		
	Agregat Halus	Kadar Air	ASTM C.566-13
		Berat Jenis	ASTM C.128-15
		Analisa Saringan	ASTM C.136-1996
		Berat Volume	ASTM C.29-1991
		Kadar Lumpur	ASTM C.117-13
		Kadar organic	ASTM C.40-92
B	Pengujian Mortar	<i>Workability</i>	ASTM C-305-82
		<i>Setting time</i>	ASTM C-305-82
C	Pengujian Mekanis	Kuat Tekan	SNI 03-6882-2002
		Kuat Lentur	ASTM C 78-94
D	Pengujian Durabilitas	Porositas	ASTM C 642-90
		UPV <i>Test</i>	ASTM C-597

Dalam pembuatan mortar *mix design* adalah proses pencampuran agregat halus, semen dan air kedalam satu wadah kemudian diaduk menjadi satu kesatuan material. Perencanaan mortar menggunakan komposisi 1 : 3 metode *mix design* yang digunakan adalah metode SNI 03-6825-2002 (BSN 2002b) dengan uraian seperti berikut.

TABEL III
KOMPOSISI BAHAN

Persentase Bakteri	Komposisi Bahan			
	Semen (gram)	Agregat Halus (gram)	Air (gram)	Bakteri (gram)
0%	2341	7023	1405	0
20%	2341	7023	1124	281
40%	2341	7023	843	562
60%	2341	7023	562	843

C. Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini bentuk dan ukurannya disesuaikan dengan standar pengujian yang berlaku. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini untuk pengujian kuat tekan benda uji kubus dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm, untuk pengujian kuat lentur 30 mm x 30 mm x 130 mm, untuk pengujian porositas 50 mm x 50 mm x 50 mm, untuk pengujian UPV 100 mm x 100 mm x 100 mm.

TABEL IV
JUMLAH BENDA UJI

Rendaman	Bakteri	Uji Sifat Mekanis				Uji Durabilitas			
		Kuat Tekan		Kuat Lentur		UPV		Porositas	
		28 Hari	56 Hari	28 Hari	56 Hari	28 Hari	56 Hari	28 Hari	56 Hari
Air Biasa (28 Hari)	0%	3	3	3	3	3	3	3	3
	20%	3	3	3	3	3	3	3	3

	40%	3	3	3	3	3	3	3	3
	60%	3	3	3	3	3	3	3	3
Lingkungan Sulfat (28 Hari)	0%								
	20%								
	40%								
	60%								
Jumlah Total		12	24	12	24	12	24	12	24
									144

D. Perawatan Benda Uji

Pada penelitian ini terdapat dua tahap perendaman benda uji. Pertama, perawatan benda uji (*curing*) pada genangan air tawar selama 28 hari. Kedua, perendaman benda uji pada larutan sulfat dan air tawar sebagai kontrol yang dilakukan setelah perendaman 28 hari pada air tawar. Perendaman 28 hari pertama dimaksudkan agar benda uji terlebih dahulu matang, setelah itu benda uji dimasak ke rendaman air tawar dan asam sulfat. Larutan asam sulfat dibuat dengan mencampurkan asam sulfat (H₂SO₄) ke dalam air tawar sampai pH mencapai 2 dan larutan tersebut diganti setiap 2 hari.

E. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Metode pengujian UPV sering digunakan untuk mendeteksi retak internal dan cacat lainnya termasuk perubahan dari beton seperti penurunan kualitas beton akibat lingkungan kimia yang agresif atau pembekuan dan pencairan [15]. Dengan menggunakan metode kecepatan pulsa juga dapat memperkirakan kekuatan dari benda uji beton maupun beton dilapangan. Metode ini menggunakan gelombang mekanik yang tidak menimbulkan kerusakan pada elemen beton yang diuji.

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) test adalah cara untuk memperkirakan kekerasan beton yang didasarkan pada hubungan cepat-rambat gelombang melalui media beton dengan kekuatan tekan beton itu [17]. Kualitas beton dapat diprediksi seperti yang terlihat di Tabel V berikut.

TABEL V
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)

F. Pengujian Porositas

Porositas adalah besarnya persentase ruang-ruang kosong atau besarnya kadar pori yang terdapat pada beton dan merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi kekuatan beton [13]. Benda uji diambil dari tempat perawatan, kemudian direndam selama dua minggu agar pori-pori seluruhnya terisi dengan air lalu ditimbang beratnya (W_{ssd}). Benda uji dimasukkan kedalam oven hingga mencapai berat tetap lalu ditimbang (W₀). Pada penelitian ini, menggunakan kubus dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Sifat Fisis Material

1) *Agregat Halus* : Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir halus dengan ukuran butiran < 4,75 mm, dan hasil pemeriksaan sifat fisis terhadap agregat halus dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

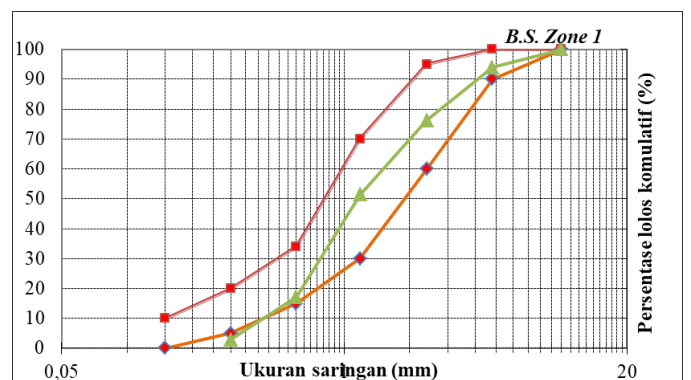
TABEL VI
HASIL PENGUJIAN SIFAT FISIS AGREGAT HALUS

No	Jenis Pengujian	Hasil analisa rata-rata	Standar ASTM	Satuan	Standar Pengujian
1	Berat volume	1558,35	>1445	gr/cm ³	ASTM C.29-1991
2	Berat Jenis (SSD)	2,44	1.6- 3.2	-	ASTM C128-15
3	Fine Modulus	2,58	2.3 - 3.1	-	ASTM C.33-01
4	Water Absorbtion	2,18	Max 12%	%	ASTM C128-15
5	Kandungan Air	2,09	Max 10%	%	ASTM C.566-13
6	Kadar Lumpur	1,63	5%	%	ASTM C.117-13
7	Kadar Organik	Kuning muda	no.2	-	ASTM C.40-92

Tabel VI Menunjukkan bahwa hasil dari pengujian sifat fisis agregat halus telah memenuhi ketentuan yang telah disyaratkan oleh standar ASTM. Selanjutnya, untuk analisa saringan agregat halus dengan tujuan mengetahui ukuran butir dan gradasi agregat halus, untuk keperluan campuran mortar dapat dilihat pada Tabel VII berikut.

TABEL VII
ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS

Mesh	Berat Ayak	Berat Ayak + agregat	Tertahan		Kumulatif	
	Kosong (gr)	Agregat (gr)	Berat (gr)	Persen (%)	Tertahan (%)	Lolos (%)
4.75	453.2	453.2	0	0.00	0.00	100.00
2.36	436.09	496.49	60.40	6.04	6.04	93.96
1.18	421.66	599.79	178.13	17.80	23.84	76.16
0.6	407.85	655.43	247.58	24.74	48.58	51.42
0.3	401.22	744.97	343.75	34.35	82.93	17.07
0.15	377.25	518.66	141.41	14.13	97.07	2.93
0.075	393.16	418.4	25.24	2.52	100,0	0
Pan	471.46	475.58	4.12	0.41		
			1001	100.00	258	

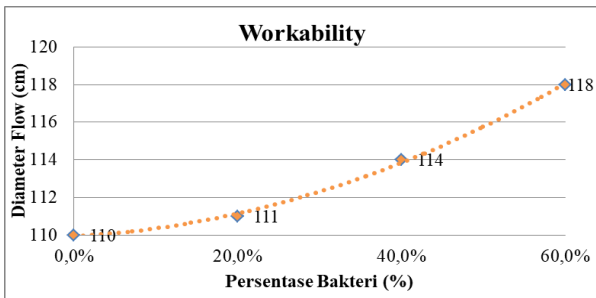


Gambar 1. Kurva Gradasi Agregat Halus

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa gradasi untuk agregat halus telah memenuhi syarat dari BS 882-92, dimana gradasinya masuk pada zona I yaitu dengan kondisi pasir kasar. Nilai *Fineness Modulus* (FM) memperlihatkan bahwa data modulus kehalusan agregat halus yaitu 2,58 yang telah memenuhi spesifikasi gradasi sesuai persyaratan ASTM C33-01.

B. Pengujian Karakteristik Mortar Semen

1) *Workability* : Pengujian *workability* menggunakan alat *flow table* dengan mengukur diameter sebaran mortar yang ditambahkan bakteri *Bacillus Subtilis* 0% untuk kontrol, 20%, 40%, dan 60% dari volume air. Adapun hasil pengujian diperlihatkan pada gambar 2 berikut.



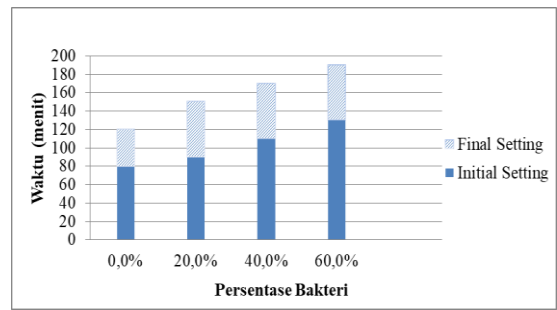
Gambar 2. *Workability* Mortar

Grafik diatas menyimpulkan bahwa dengan penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* dalam adukan mortar akan meningkatkan workabilitas, dimana peningkatan workabilitas adukan tersebut sejalan dengan penambahan persentase bakteri *Bacillus Subtilis*. Hal ini disebabkan semakin banyak persentase bakteri dalam adukan mortar maka air yang digunakan semakin sedikit, sehingga menyebabkan *setting process* mortar semakin lambat, sehingga pada saat proses pengadukan mortar tanpa bakteri proses pengikatannya lebih cepat dari pada mortar dengan bakteri sehingga pada saat proses uji *workability* terjadi peningkatan seiring bertambahnya persentase bakteri.

2) *Setting Time* : Pengujian *setting time* dilakukan berdasarkan rentang waktu setiap 15 menit sekali, sampai jarum tidak sampai menyentuh dasar/alas cetakan. Kemudian dilakukan pada setiap 10 menit. Pengujian *setting time* dilakukan sampai jarum pada alat vicat tercapai penembusan sedalam ± 10 mm. Persentase perubahan hasil pengujian *setting time* terhadap penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* untuk waktu awal dan waktu akhir dapat dilihat pada Tabel VIII berikut.

TABEL VIII
NILAI *SETTING TIME* MORTAR

Persentase Bakteri (%)	Initial Setting	Penetrasi (mm)	Final Setting	Penetrasi (mm)
0%	80	26	120	10
20%	90	25	150	10
40%	110	25	170	10
60%	130	25	190	10



Gambar 3. *Setting Time* Mortar

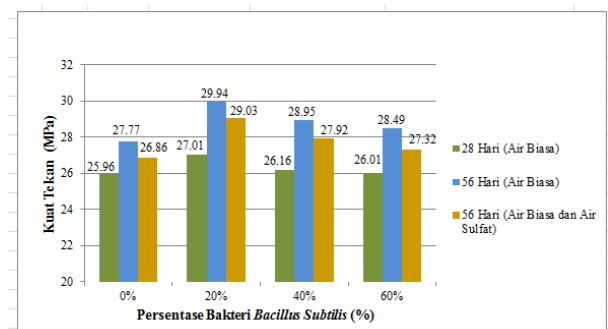
Waktu pengikatan awal dan akhir mortar dengan dan tanpa bakteri dilakukan sesuai dengan ASTM C-305-82. Dari hasil pengujian menggunakan alat Vicat seperti yang terlihat pada gambar 3, bahwa pada pengikatan awal (*initial setting time*) bakteri memberikan pengaruh yang besar terhadap waktu pengerasan, demikian juga untuk proses pengikatan akhir (*final setting time*). Terlihat bahwa waktu pengikatan mortar dengan persentase bakteri 20%, 40% dan 60% meningkat secara signifikan sehingga seiring bertambahnya persentase bakteri dalam adukan mortar waktu pengikatan akan semakin meningkat.

C. Pengujian Sifat Mekanis

1) *Kuat tekan* : Berdasarkan Tabel IX terlihat bahwa penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* sebesar 20% dari volume air dapat meningkatkan kuat tekan mortar. Peningkatan kuat tekan mortar bakteri dibandingkan mortar kontrol kemungkinan karena adanya pengendapan kalsit pada matriks mortar yang mengisi pori-pori, dan peningkatan kuat tekan kemungkinan terjadi karena media cair yang menjadi wadah bakteri yang menggantikan posisi air pada mortar [22]. Oleh karena itu bakteri membantu mengisi pori-pori mikro pada mortar dan meningkatkan kuat tekan.

TABEL IX
NILAI HASIL KUAT TEKAN DENGAN DITAMBAHKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*

Metode Perawatan	Persentase Bakteri	28 Hari		56 Hari	
		Kuat Tekan	% Peningkatan relatif terhadap kontrol	Kuat Tekan	% Peningkatan relatif terhadap kontrol
Air Tawar	0%	25,96	-	27,77	-
	20%	27,01	4,04	29,94	7,81
	40%	26,16	0,77	28,95	4,25
	60%	26,01	0,19	28,49	2,59
Air Tawar dan Air Sulfat	0%			26,86	-
	20%			29,03	5,92
	40%			27,92	2,61
	60%			27,32	1,38



Gambar 4. Hasil kuat tekan dengan ditambahkan bakteri *Bacillus Subtilis*

Gambar 4 memperlihatkan peningkatan dan penurunan kuat tekan mortar bakteri. Peningkatan kuat terjadi pada perendaman dengan air biasa, dimana penambahan bakteri sebesar 20% pada umur 56 hari perawatan air biasa mampu meningkatkan kuat tekan sampai 7,81% dibanding kontrol. Sedangkan persentase bakteri 40% dan 60% terjadi peningkatan sebesar 4,25% dan 2,59% dibanding kontrol. Sehingga semakin banyak penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* semakin memperkecil peningkatan kuat tekan. Hal ini menunjukkan bahwa persentase bakteri 20% dapat diperlakukan sebagai persentase bakteri yang optimal untuk peningkatan kuat tekan.

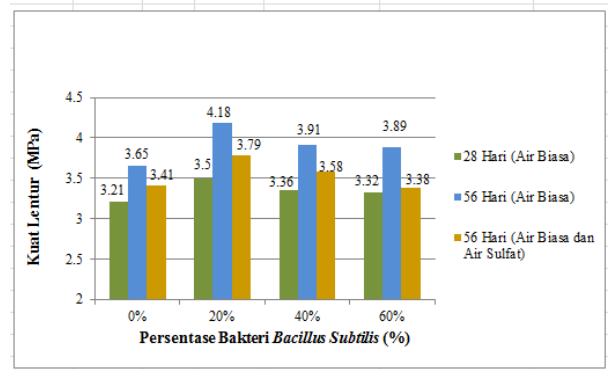
Namun pada benda uji mortar setelah direndam dengan air biasa 28 hari kemudian dilanjutkan perendaman dengan lingkungan agresif (larutan sulfat) selama 28 hari, akan mengakibatkan menurunnya kuat tekan mortar. Penurunan maksimum terjadi pada mortar tanpa bakteri sebesar 26,86 MPa atau menurun 3,27% dibanding perawatan air biasa umur 56. Sedangkan pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% terjadi penurunan sebesar 5,92%, 2,61%, 1,38% dibanding kontrol. Hal ini disebabkan hasil reaksi antara sulfat dengan pasta semen yang dapat menghasilkan *ettringite*. Pembentukan *ettringite* akibat serangan sulfat dapat menyebabkan ekspansi, retak dan kehancuran pada mortar [18]. Kehadiran *ettringite* akan mengembangkan volume beton sehingga menyebabkan tegangan internal pada beton yang menyebabkan terjadinya retak mikro [19].

Dari analisa hasil uji kuat tekan mortar diatas menunjukkan bahwa penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* dapat meningkatkan kuat tekan pada mortar yang dilakukan perawatan pada air biasa. Namun semakin banyak penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* memperkecil peningkatan kuat tekan pada benda uji mortar yang direndam dalam larutan sulfat dan dapat menurunkan kuat tekan.

- 2) **Kuat Lentur** : Berdasarkan table X terlihat bahwa bakteri *bacillus subtilis* sebesar 20% dapat meningkatkan kuat lentur mortar. Hal ini kemungkinan disebabkan dengan adanya bakteri yang menghasilkan senyawa kalsit sehingga berdampak positif terhadap kuat lentur mortar dan peningkatan kuat lentur kemungkinan terjadi karena *nutrient* yang terkandung pada media cair yang menjadi wadah bakteri, menggantikan posisi air pada mortar.

TABEL X
NILAI HASIL KUAT LENTUR DENGAN DITAMBAHKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*

Metode Perawatan	Persentase Bakteri	28 Hari		56 Hari	
		Kuat Lentur	% Meningkatkan relatif terhadap kontrol	Kuat Lentur	% Meningkatkan relatif terhadap kontrol
Air Tawar	0%	3.21	-	3.65	-
	20%	3.5	9.03	4.18	14.52
	40%	3.36	4.67	3.91	7.12
	60%	3.32	3.43	3.89	6.58
Air Tawar dan Air Sulfat	0%			3.41	-
	20%			3.79	11.14
	40%			3.58	4.99
	60%			3.38	0.88



Gambar 5. Hasil kuat lentur dengan ditambahkan bakteri *Bacillus Subtilis*

Berdasarkan Gambar 5 memperlihatkan peningkatan dan penurunan kuat lentur mortar bakteri. Peningkatan kuat lentur terjadi pada perendaman dengan air biasa, dimana penambahan bakteri sebesar 20% pada umur 56 hari perendaman air biasa mampu meningkatkan kuat lentur sebesar 4,18 MPa atau meningkat 14,52% dibanding kontrol. Sedangkan persentase bakteri 40% dan 60% terjadi peningkatan sebesar 7,12% dan 6,58% dibanding kontrol, karenanya persentase bakteri 20% dapat diperlakukan sebagai persentase bakteri yang optimal untuk peningkatan kuat lentur.

Namun untuk mortar setelah direndam dengan air biasa 28 hari kemudian dilanjutkan perendaman dengan larutan sulfat selama 28 hari, terjadi penurunan kuat lentur. Penurunan maksimum terjadi pada benda uji kontrol sebesar 3,41 MPa. Sedangkan pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% terjadi penurunan sebesar 11,14%, 4,99%, 0,88% dibanding kontrol. Hal ini disebabkan karena senyawa sulfat (SO_4) akan bereaksi dengan senyawa-senyawa hidrasi semen seperti *calcium hydroxide* (CH) dan *calcium aluminat hydrate* ($C_3A.CHH_{18}$), *monosulfate hydrate* ($C_3A.CH.H_{12-18}$) yang menghasilkan *ettringite*, dimana kehadiran *ettringite* akan mengembangkan volume beton sehingga menyebabkan tegangan internal pada beton yang menyebabkan terjadinya retak mikro [19].

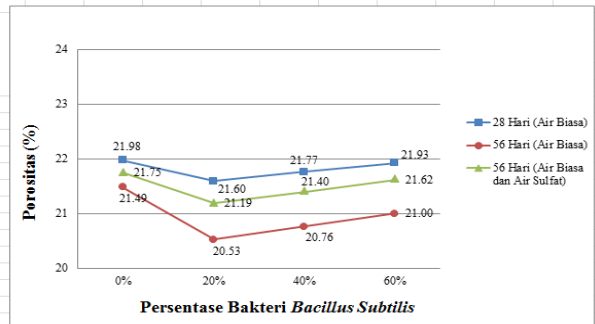
Dari analisa hasil uji kuat lentur mortar diatas menunjukkan bahwa penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* dapat meningkatkan kuat lentur pada mortar yang dilakukan perawatan pada air biasa. Akan tetapi, mortar bakteri yang direndam pada larutan sulfat tidak berpengaruh baik dan dapat menurunkan kuat lentur.

D. Pengujian Durabilitas Mortar

- 1) **Porositas Mortar** : Berdasarkan Tabel XI dan Gambar 6 menunjukkan penurunan dan peningkatan nilai porositas mortar yang menggunakan bakteri *Bacillus Subtilis*, terlihat bahwa pada mortar yang perawatan air biasa umur 56 hari terjadi penurunan nilai porositas mortar, dimana penurunan maksimum terjadi pada mortar dengan bakteri 20% atau menurun sebesar 4,47% dibanding kontrol. Sedangkan persentase media bakteri 40% dan 60% terjadi penurunan sebesar 3,40% dan 2,28% dibanding kontrol, karenanya persentase media bakteri 20% dapat diperlakukan sebagai persentase media bakteri yang optimal untuk peningkatan kuat lentur.

TABEL XI
NILAI HASIL POROSITAS DENGAN DITAMBAHKAN
BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*

Metode Perawatan	Persentase Bakteri	28 Hari		56 Hari	
		Porositas	% Penurunan	Porositas	% Penurunan
Air Tawar	0%	21,98	-	21,49	-
	20%	21,60	1,82	20,53	4,47
	40%	21,77	1,05	20,76	3,40
	60%	21,93	0,32	21,00	2,28
Air Tawar dan Air Sulfat	0%	-	-	21,75	-
	20%	-	-	21,19	2,57
	40%	-	-	21,40	1,61
	60%	-	-	21,62	0,64



Gambar 6. Hasil pengujian porositas mortar dengan variasi bakteri

Nilai-nilai porositas diatas menunjukkan bahwa dengan penambahan bakteri pada adukan mortar akan memberi pengaruh terhadap nilai porositas mortar yang dirawat dilingkungan air biasa. Dengan nilai porositas rendah yang dimiliki oleh mortar bakteri, ini menunjukkan bahwa mortar bakteri memiliki ruang pori yang kosong lebih sedikit, hal ini membuktikan bahwa bakteri berkembang pada mortar. Tingkat penurunan nilai porositas semakin kecil seiring bertambahnya persentase bakteri kemungkinan terjadi karena adanya reaksi semen dengan media cair yang menjadi wadah bakteri. Media cair tersebut mengandung zat kimia menggantikan posisi air pada mortar.

Namun mortar yang telah direndam selama 28 hari dengan air biasa dan dilanjutkan dengan lingkungan agresif (larutan sulfat) selama 28 hari menyebabkan terjadi peningkatan nilai porositas. Peningkatan porositas mortar pada perendaman dengan larutan sulfat pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 2,57%, 1,61%, 0,64% dibanding kontrol. Peningkatan ini menyebabkan mortar menjadi porous. Peningkatan nilai porositas dikarenakan adanya reaksi antara senyawa sulfat (SO₄) akan bereaksi dengan senyawa-senyawa hidrasi semen seperti *calcium hydroxide* (CH) dan *calcium aluminate hydrate* (C₃A.CS H₁₈), *monosulfate hydrate*(C₃A.CH.H₁₂₋₁₈) yang menghasilkan *ettringite*, dimana kehadiran *ettringite* akan mengembangkan volume beton sehingga menyebabkan beton menjadi porous [19].

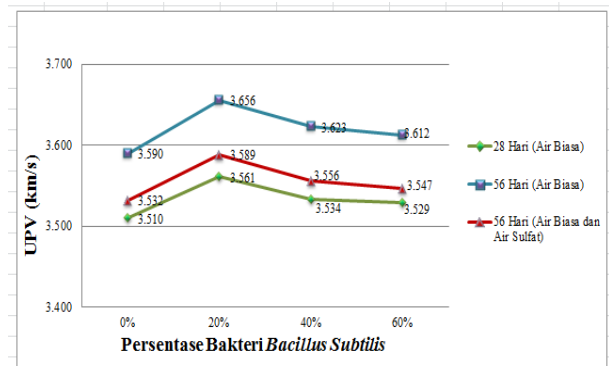
Pada lingkungan asam, porositas merupakan salah satu sifat fisik yang berpengaruh terhadap kualitas mortar atau beton. Reaksi kimia antara mortar dan air rendaman berupa sulfat dapat mendesak kapiler mortar sehingga dapat memperbesar angka porositas mortar dan menurunkan kuat tekan mortar [20].

2) *Pengujian UPV* : Pengujian UPV dilakukan pada mortar umur 28 hari, 56 hari setelah perawatan dengan air biasa dan air sulfat, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan bakteri *Bacillus Subtilis* meningkatkan sifat mekanis dan durabilitas setelah

dilakukan perawatan dengan air biasa dan air sulfat. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM C 597-02 IDT dengan menggunakan alat *Portable Unit Non Destructive Indicator Tester* (PUNDIT) merk Proceq. Pengujian nilai kecepatan rambat gelombang pada benda uji dilakukan dengan menggunakan metode *Direct Transmission*. Adapun data hasil UPV mortar dengan variasi persentase penambahan bakteri 0% untuk normal, 20%, 40%, 60% pada pengujian hasil porositas dilihat pada Tabel XII berikut.

TABEL XII
NILAI HASIL UPV DENGAN DITAMBAHKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS*
PADA MORTAR

Metode Perawatan	Persentase Bakteri	28 Hari		56 Hari	
		UPV	% Peningkatan relatif terhadap kontrol	UPV	% Peningkatan relatif terhadap kontrol
Air Tawar	0%	3.510	-	3.590	-
	20%	3.561	1.45	3.656	1.84
	40%	3.534	0.68	3.623	0.92
	60%	3.529	0.54	3.612	0.61
Air Tawar dan Air Sulfat	0%	-	-	3.532	-
	20%	-	-	3.589	1.61
	40%	-	-	3.556	0.68
	60%	-	-	3.547	0.42



Gambar 7. Kecepatan rambatan UPV dengan *direct transmission*

Berdasarkan Gambar 7 dapat disimpulkan bahwa nilai pengujian UPV menunjukkan bahwa semakin bertambahnya umur mortar dengan bakteri *Bacillus Subtilis* maka semakin tinggi persentase pertumbuhan bakteri dalam menutupi retakan pada mortar sehingga menurunnya nilai waktu transmisi maka nilai UPV meningkat. Namun mortar tanpa bakteri terjadi peningkatan nilai waktu transmisi setelah dirawat pada larutan sulfat sehingga nilai UPV menurun.

Persentase optimum pertumbuhan bakteri dalam menutupi keretakan yaitu 20% pada umur 56 hari dengan nilai 3,636 km/s atau meningkat sebesar 1,84% dibanding kontrol. Sedangkan persentase bakteri 40% dan 60% terjadi peningkatan sebesar 0,92 % dan 0,61% dibanding kontrol. Sehingga semakin banyak penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* semakin memperkecil peningkatan kuat tekan. Media cair tersebut mengandung zat kimia berupa natrium yang menggantikan posisi air pada mortar. Berdasarkan standar Rating Kecepatan Pulsa Ultrasonik Untuk Beton Menurut Vienna (*International Atomic Energy Agency*, 2002), kecepatan rambatan pada benda uji Kontrol pada kecepatan 3,5-4,5 km/detik tergolong dalam kualitas bagus.

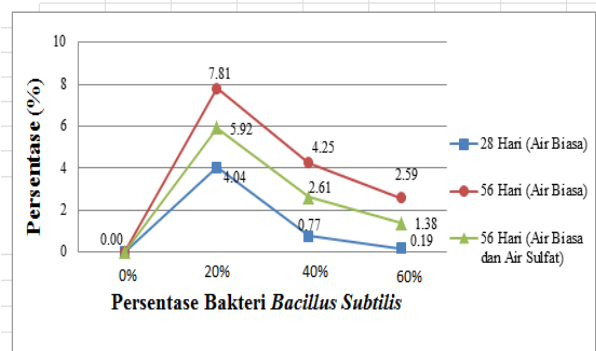
Namun pada benda uji mortar setelah direndam dengan air biasa 28 hari kemudian dilanjutkan perendaman dengan

lingkungan agresif (larutan sulfat) selama 28 hari, hasil pengujian UPV menunjukkan waktu transmisi lebih lama sehingga nilai UPVnya menurun. Penurunan maksimum nilai UPV yang direndam pada larutan sulfat sebesar 3,532 km/s pada mortar dengan persentase bakteri 0%. Sedangkan pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% terjadi penurunan 1,61%, 0,68%, 0,42% dibanding kontrol. Hal ini disebabkan hasil reaksi antara sulfat dengan pasta semen yang dapat menghasilkan *ettringite*. Pembentukan *ettringite* akibat serangan sulfat dapat menyebabkan ekspansi, retak dan kehancuran pada mortar [18].

E. Hubungan Persentase Peningkatan Kuat Tekan terhadap Bakteri

Berdasarkan Gambar 8. menunjukkan persentase peningkatan kuat tekan. Peningkatan maksimum terjadi pada perawatan air biasa umur 56 hari pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 7,81%, 4,25%, 2,59% dibanding kontrol. Nilai peningkatan kuat tekan semakin kecil seiring terjadinya peningkatan persentase bakteri *Bacillus Subtilis*. Meningkatnya kuat tekan kemungkinan disebabkan adanya pengendapan kalsit pada matriks mortar mengisi pori-pori dan media bakteri *Bacillus Subtilis* yang mengandung zat kimia berupa *nutrient* berpengaruh terhadap penurunan peningkatan kuat tekan.

Namun pada mortar yang direndam lingkungan agresif (larutan sulfat) nilai kuat tekan menurun dibanding yang direndam pada air biasa (air tawar), namun penurunan tidak melebihi mortar tanpa bakteri. Pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% menurun sebesar 5,92%, 2,61%, 1,38% dibanding kontrol. Hal ini kemungkinan disebabkan reaksi pasta semen dengan larutan sulfat yang dapat menghasilkan *ettringite*. Pembentukan *ettringite* akibat serangan sulfat dapat menyebabkan ekspansi, retak dan kehancuran pada beton [18].

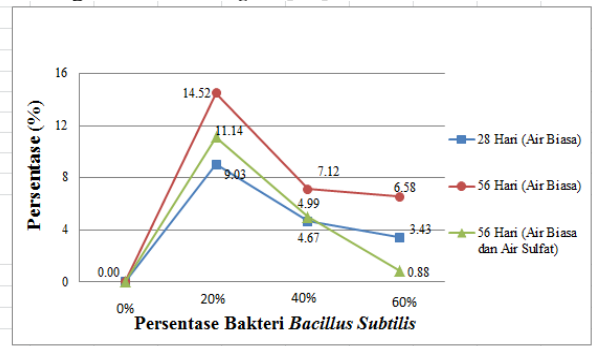


Gambar 8. Hubungan persentase peningkatan kuat tekan

F. Hubungan Persentase Peningkatan Kuat Lentur terhadap Bakteri

Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan persentase peningkatan kuat lentur. Peningkatan maksimum terjadi pada perawatan air biasa umur 56 hari pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 14,52%, 7,12%, 6,58% dibanding kontrol. Nilai peningkatan kuat lentur semakin kecil seiring terjadinya peningkatan persentase bakteri *Bacillus Subtilis*. Meningkatnya kuat lentur kemungkinan disebabkan adanya pengendapan kalsit pada matriks mortar mengisi pori-pori dan media bakteri *Bacillus Subtilis* yang mengandung zat kimia berupa *nutrient* berpengaruh terhadap penurunan peningkatan kuat lentur.

Namun pada mortar yang direndam pada air biasa 28 hari dan dilanjutkan perendaman lingkungan agresif (larutan sulfat) 28 hari, nilai kuat lentur menurun dibanding yang direndam pada air biasa (air tawar), namun penurunan tidak melebihi mortar tanpa bakteri. Pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 11,14%, 4,99%, 0,88% dibanding kontrol. Penambahan bakteri *Bacillus Subtilis* dapat meningkatkan kuat lentur pada beton yang dilakukan perawatan pada air normal. Akan tetapi, beton bakteri yang direndam pada larutan sulfat tidak berpengaruh baik dan dapat menurunkan kuat lentur beton. Hal ini kemungkinan disebabkan reaksi pasta semen dengan larutan sulfat yang dapat menghasilkan *ettringite* [20].



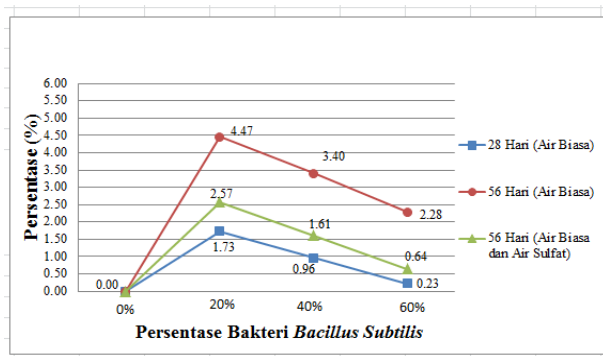
Gambar 9. Hubungan persentase peningkatan kuat lentur

G. Hubungan Persentase Penurunan Porositas terhadap Bakteri

Berdasarkan Gambar 10 menunjukkan persentase penurunan porositas. Penurunan maksimum terjadi pada perawatan air biasa umur 56 hari pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 4,47%, 3,40%, 2,28% dibanding kontrol. Nilai penurunan porositas semakin kecil seiring terjadinya peningkatan persentase bakteri *Bacillus Subtilis*. Menurunnya porositas kemungkinan disebabkan adanya pengendapan kalsit pada matriks mortar mengisi pori-pori dan media bakteri *Bacillus Subtilis* yang mengandung zat kimia berupa *nutrient* berpengaruh terhadap penurunan peningkatan kuat lentur.

Namun pada mortar yang direndam pada air biasa 28 hari dan dilanjutkan perendaman lingkungan agresif (larutan sulfat) 28 hari, nilai porositas meningkat dibanding yang direndam pada air biasa (air tawar), namun peningkatan tidak melebihi mortar tanpa bakteri. Pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 2,57%, 1,61%, 0,64% dibanding kontrol.

Hal ini disebabkan oleh kadar kapur yang terlalu tinggi sehingga mempersulit proses hidrasi semen. Ketika semen mengeras, terjadinya reaksi pembebasan kapur dan ketika hal ini terjadi maka pasta semen membentuk saluran kapiler dimana Kalsium Hidroksida akan mengalir keluar sehingga saluran tersebut terisi kapur [13].

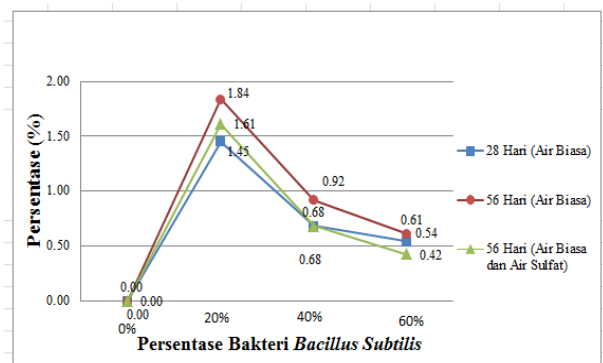


Gambar 10. Hubungan persentase penurunan porositas

H. Hubungan Persentase Penurunan UPV terhadap Bakteri

Berdasarkan Gambar 11 menunjukkan persentase peningkatan nilai UPV. Peningkatan maksimum terjadi pada perawatan air biasa umur 56 hari pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 1,84%, 0,92%, 0,61% dibanding kontrol. Nilai peningkatan UPV semakin kecil seiring terjadinya peningkatan persentase bakteri *Bacillus Subtilis*. Meningkatnya UPV kemungkinan disebabkan adanya pengendapan kalsit pada matriks mortar mengisi pori-pori dan media bakteri *Bacillus Subtilis* yang mengandung zat kimia berupa *nutrient* berpengaruh terhadap penurunan peningkatan UPV.

Namun pada mortar yang direndam pada air biasa 28 hari dan dilanjutkan perendaman lingkungan agresif (larutan sulfat) 28 hari, nilai UPV menurun dibanding yang direndam pada air biasa (air tawar), namun penurunan tidak melebihi mortar tanpa bakteri. Pada persentase bakteri 20%, 40%, 60% meningkat sebesar 1,61%, 0,68%, 0,42% dibanding kontrol.



Gambar 11. Hubungan persentase peningkatan UPV

IV. KESIMPULAN

Pada lingkungan air biasa (tawar) penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* sebesar 20% di umur 56 hari, akan meningkatkan kuat tekan sebesar 7,81% dan kuat lentur sebesar 14,52%. Hal ini disebabkan karena dengan adanya bakteri yang menghasilkan senyawa kalsit *nutrient* yang terkandung pada media bakteri.

Pada lingkungan air biasa (tawar) penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* sebesar 20% di umur 56 hari, terjadi penurunan nilai porositas sebesar 4,47% dan peningkatan UPV sebesar 1,84%. Hal ini dipengaruhi oleh aktivitas perkembangbiakan bakteri dan media bakteri.

REFERENSI

- [1] Wenda, K., Zuridah, S., Hastono, B. (2018). "Pengaruh variasi komposisi campuran mortar terhadap kuat tekan". *GeSTRAM Universitas Dr. Soetomo*. Vol. 1 No.1
- [2] Luo Mian dan Qian. (2016). "Influences of bacteria-based self-healing agents on cementitious materials hydration kinetics and compressive strength" Vol 121, Hal 659-663.
- [3] Elisa, N., Djauhari, Z., Yuniarto, E. (2018). "Sifat Mekanik Beton Dengan Menambah Bakteri *Bacillus Subtilis* Untuk Aplikasi Beton Pulih Mandiri". *Jom FTEKNIK Universitas Riau* Vol.5 Edisi 5.
- [4] Afifah, S. (2017). Pengaruh Kuat Lentur Balok Self Healing Concrete Dengan Bakteri *Bacillus Subtilis* Terhadap Umur Perawatan. Tugas Akhir. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- [5] Arfa, A.W., Djauhari, Z dan Yuniarto, E. (2018). "Sifat Fisik Beton Pulih Mandiri Dengan Memanfaatkan Bakteri *Bacillus Subtilis*" *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains Universitas Riau*.
- [6] Sharma, Piyush. (2016). "A Study on Self Healing Mecanism of Microcracks in Concrete Structures Using *Bacillus Bacteria*". *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 02.
- [7] Tullah, Hidayat. (2019). Studi Eksperimental Pengaruh Persentase Campuran *Bacillus Cereus* Terhadap Kuat Tekan Beton Pada Self Healing Concrete (SHC). Skripsi. Palembang: Universitas Sriwijaya.
- [8] Rachmawaty, F. J. (2020). Media. [Online] Tersedia : https://fk.uui.ac.id/mikrobiologi/materi/media/diakses_pada_5_Juni_2021
- [9] Caesar, A. (2020). *Durabilitas Beton*. [Online] Tersedia: <https://www.scribd.com/user/92943817/Aditya-Caesar> diakses pada 19 Februari 2021.
- [10] Hutapea, U., Olivia, M., & Romey I.S. (2014). "Ketahanan Mortar Di Lingkungan Asam Dengan Berbagai Tipe Semen". *Jurnal Teknik Sipil*. Universitas Riau.
- [11] Putra,W.A., Olivia, M., & Saputra, E. (2020). "Ketahanan Beton Semen Portland Composite Cement (PCC) Di Lingkungan Gambut Kabupaten Bengkalis ". *Jurnal Teknik Sipil*. Universitas Riau Vol. 14 No. 1.
- [12] Lala, R., Hussain, A., dan Akhtar, S. (2014). "Self-Healing Concrete".
- [13] Rinanda, R., Olivia, M., & Syaputra, E. (2017). "Kuat Tekan Dan Porositas Beton Opc Dan Opc Pofa Dengan Air Pencampur Gambut Menggunakan Bahan Aditif". *Jom FTEKNIK*. Universitas Riau Vol.4 No. 2
- [14] Tizia, H., Olivia, M., & Saputra, E. 2020. "Kuat Tekan dan Porositas Beton menggunakan Air Gambut dan Kapur Tohor untuk Konstruksi di Lingkungan Gambut ". *Jurnal Teknik Sipil Universitas Riau*.
- [15] Malhotra, V.M. & Carino, N.J. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- [16] Hizrian. (2017). *Pengertian Agregat* [Online] Tersedia: [Ultrasonic Pulse Velocity Test Untuk Memperkirakan Kekuatan Dan Keseragaman Mutu Beton K 200 Secara Non Destruktif". *JURNAL BANGUNAN, VOL.20, NO.1, DESEMBER 2015: 43-52*](https://medium.com/@hizrian/pengertian-agregat-dan-klasifikasinya-342a92049a98?xt=Agregat%20halus%20untuk%20beton%20dapat,pasir%20halus%20(Fine%20Sand) diakses pada 11 Februari 2021.
[17] Wedhanto. (2015).)
- [18] Fitriana, Y., Djauhari, Z., & Yuniarto, E. (2018). "Pengaruh Bahan Tambah Bakteri *Bacillus Subtilis* Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Di Lingkungan Sulfat". *Jom FTEKNIK Universitas Riau* Vol.5 Edisi 2.
- [19] Rizal, F. (2004). Menentukan Kecepatan Penetrasi Ion Klorida Dalam Beton Copper Slag untuk Memprediksi Durabilitas Beton. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [20] Desmiletari, K., Djauhari, Z., & Yuniarto, E. (2018). "Sifat Fisik Beton Dengan Bahan Tambah Bakteri *Bacillus Subtilis* Pada Lingkungan Sulfat". *Jom FTEKNIK Universitas Riau* Vol.5 Edisi 2.
- [21] Nirma S. (2018). Aplikasi Bakteri *Bacillus Subtilis* Dengan Dosis Yang Berbeda Terhadap Dinamika Fitoplankton Pada Tambak Intensif Udang Vaname (*Litopanaeus vannamei*). Skripsi. Makassar: Universitas Muhammadiyah Makassar.
- [22] Ghosh S., Biswas., Chattopadhyay., & Mandal S. (2009). "Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar, Cement and Concrete Composite". 31 (2).