

Pengaruh Bakteri *Bacillus Megaterium* sebagai *Self-Healing Agent* pada Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi

LULU FAUZIAH², SITI MUTIARA MURHAYATI², LUTHFI MUHAMMAD M^{1*},
LINDA AISYAH¹

¹Dosen Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Indonesia

²Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Indonesia

Email: luthfi-mm@polban.ac.id

ABSTRAK

*Sifat beton yang lemah terhadap tarik memungkinkan terjadinya retakan mikro dan dapat merambat menjadi retakan makro, apabila retakan tersebut tidak terdeteksi. Oleh karena itu, muncul inovasi yang disebut dengan Self-healing concrete (SHC), yaitu beton dapat menutupi retakan mikro secara mandiri tanpa adanya perlakuan dari manusia. Pada penelitian ini, digunakan bakteri *Bacillus megaterium* sebagai healing agent kemudian diterapkan pada beton mutu tinggi rencana 45 MPa berdasarkan pedoman ACI 211-4r.93, dengan kadar substitusi semen oleh fly ash sebanyak 25% dan persentase bakteri sebesar 2% dari komposisi air yang digunakan. Hasilnya, diperoleh peningkatan nilai kuat tekan pada beton bakteri umur 28 hari sebesar 12,662% terhadap beton kontrol. Dimana nilai kuat tekan rata-rata 62,199 MPa pada beton bakteri dan 55,208 MPa untuk beton kontrol. Selain itu, beton bakteri mulai menunjukkan proses self-healing pada hari ke-21 pasca pengujian dan lebar ukuran retakan mikro yang dapat diperbaiki bakteri adalah berkisar 0,66-2,76 mm.*

Kata kunci: beton mutu tinggi, self-healing concrete, *bacillus megaterium*, kuat tekan

ABSTRACT

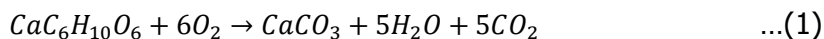
*The weak tensile properties of concrete allow micro-cracks to occur and propagate into macro-cracks if they are not detected. Therefore, an innovation called Self-healing concrete (SHC) emerged, where concrete can cover micro-cracks independently without human treatment. In this study, *Bacillus megaterium* bacteria were used as a healing agent. Then they applied to high-strength concrete plan 45 MPa based on ACI guideline 211-4r.93, with a cement substitution content by fly ash of 25% and a percentage of bacteria of 2% of the composition of the water used. As a result, an increase in compressive strength value was obtained in bacterial concrete aged 28 days by 12.662% against control concrete. Where bacterial concrete was 7,524 MPa and control concrete was 7,399 MPa. In addition, bacterial concrete began to show a self-healing process on the 21st day after the compressive test, and the width of the size of micro-cracks that bacteria can repair is in the range of 0.66-2.76 mm.*

Keywords: high strength concrete, self-healing concrete, *bacillus megaterium*, compressive strength

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan suatu komponen penyusun struktur bangunan yang umum digunakan sampai saat ini [14]. Hal ini mengacu pada kelebihanannya, seperti kuat terhadap tekan, tahan lama, mudah diaplikasikan, dan mudah didapatkan. Namun di samping dari kelebihan tersebut, beton memiliki kelemahan utama yaitu lemah terhadap tarik dan memiliki tingkat kerapuhan yang tinggi, menjadikan beton rentan terhadap adanya retakan. Retakan pada beton bisa dimulai dari retakan mikro kemudian merambat menjadi retakan makro apabila retakan mikro tidak terdeteksi. Retakan makro memungkinkan air, ion klorida, dan bahan kimia yang berbahaya dapat masuk ke dalam rongga beton sehingga berpengaruh pada kekuatan material yang berdampak pada kekuatan dan daya tahan struktur beton [6]. Akibatnya, diperlukan suatu perawatan dan perbaikan pada struktur beton. Namun pada kenyataannya, lokasi retak tidak selalu berada pada tempat yang strategis dan mudah untuk dijangkau, dan dalam pelaksanaannya, perawatan struktur beton akan mengeluarkan biaya yang tidak sedikit serta membutuhkan waktu yang lama [1]. Maka dari itu, retak pada beton khususnya retakan mikro perlu diperhatikan, salah satunya dengan inovasi *self-healing concrete*, yaitu beton yang dapat memperbaiki dirinya sendiri ketika terjadi retakan [16].

Self-healing concrete merupakan inovasi yang memanfaatkan *healing-agent* berupa mikroorganisme yaitu bakteri yang memiliki sifat alkalinitas tinggi untuk dapat bertahan hidup di lingkungan ekstrem seperti beton, salah satunya bakteri *Bacillus megaterium* [13]. Ketika terjadi retakan, kelembaban dan oksigen memasuki zona retak, bakteri aktif dan prekursor nutrisi yaitu kalsium laktat dilarutkan dari partikel mikroba untuk membentuk lingkungan yang cocok untuk spora berkecambah, dan mulai mengendapkan kalsium karbonat (CaCO_3). Sejumlah CaCO_3 terbentuk, dan mengisi retakan pada beton [15]. *Self-healing* digambarkan dengan **Persamaan 1** berikut [7]:



Pengaplikasian *self-healing concrete* ini perlu diterapkan pada beton mutu tinggi, karena beton mutu tinggi memiliki karakteristik kuat tekan lebih dari 41,4 MPa [5]; dan sifatnya lebih padat berbeda dengan beton mutu normal; sehingga belum diketahui bagaimana efektivitas bakteri dalam beton mutu tinggi untuk memperbaiki retakan mikro serta pengaruhnya terhadap nilai kuat tekan. Selain itu, berbagai penelitian terdahulu menunjukkan penggunaan bakteri ini berpengaruh positif pada beton mutu normal [2] [12], akan tetapi belum ada penelitian yang mengaplikasikannya pada rancangan mutu tinggi dengan mengacu pada pedoman ACI 211-4r-93. Dalam rancangannya, digunakan substitusi semen oleh *fly ash* tipe F sebanyak 25%, untuk mengurangi produksi semen yang sampai saat ini menimbulkan kerusakan lingkungan karena emisi CO_2 di udara; menggunakan *admixture superplasticizer* tipe F 0,6%; dan persentase bakteri sebesar 2% dari komposisi air yang digunakan. Maka dari penelitian ini, diharapkan dapat diketahui pengaruh bakteri *Bacillus megaterium* sebagai *self-healing agent* pada nilai kuat tekan beton mutu tinggi rencana 45 MPa.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian ini disusun dengan merujuk pada beberapa studi literatur yang dirangkum berdasarkan ruang lingkup pembahasan. Ruang lingkup rujukan pertama membahas mengenai penelitian *self-healing concrete* dengan menggunakan bakteri genus *Bacillus spesies B. subtilis* dan *B. megaterium*. Berdasarkan literatur, diperoleh kenaikan kuat tekan sebesar 15,86% dan didapatkan kerja optimum bakteri dengan spesies *B. megaterium* yang menghasilkan lebih banyak CaO dibanding *B. subtilis* [12].

Ruang lingkup rujukan kedua merangkum mengenai penelitian *self-healing concrete* yang hanya menggunakan bakteri spesies *B. megaterium*. Digunakan variabel mutu beton dan konsentrasi bakteri. Didapatkan bakteri yang bekerja optimal pada konsentrasi 30×10^5 cfu/ml dengan mutu beton 50 MPa. Diketahui peningkatan kekuatan maksimum mencapai 24% [3].

Ruang lingkup rujukan ketiga membahas mengenai penelitian *self-healing concrete* menggunakan bakteri genus *Bacillus* spesies *B. subtilis* dengan substitusi semen oleh *fly ash* sebesar 25% sehingga diperoleh hasil peningkatan pada kuat tekan hingga $36,44 \text{ N/mm}^2$ [8].

2.2 Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi (*high strength concrete*) merupakan sebuah bahan yang dibuat dari campuran beton (semen, agregat, air) dan pengurangan semen dengan penambahan zat aditif sesuai dengan perbandingan sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan yang dapat membentuk kekuatan beton yang lebih tinggi. Material penyusun beton mutu tinggi adalah sebagai berikut:

a. Semen Portland Tipe I (OPC)

Karakteristik bahan semen OPC ini mengandung 6%–15% bahan campuran aktif yang diizinkan dari total massa. Dan tidak boleh melebihi 10% campuran tidak aktif dari total massa. Kemudian waktu pengikatan awal (*initial setting time*) tidak boleh lebih dari 45 menit dan waktu pengikatan akhir (*final setting time*) tidak boleh lebih dari 10 jam.

b. Fly Ash Tipe F

Karakteristik *fly ash* tipe F (*low calcium fly ash*) adalah tidak memiliki sifat mengikat (*cementitious*), dan bersifat pozolanik (mampu mereduksi kebutuhan semen portland 20-30%). *Fly ash* berbentuk partikel yang hampir bulat sehingga mempunyai kemampuan alir (*flowability*) dan *workability* yang lebih baik, ukuran partikel yang halus sehingga lebih *impermeable* (kedap air), lebih tahan abrasi, dan memperkecil susut beton. Kemampuan *fly ash* dalam menaikkan kuat tekan optimum umumnya dicapai pada umur 56 dan 90 hari, karena *fly ash* memiliki *setting time* yang lebih lambat dibanding semen, namun kemampuan *fly ash* menjadi sangat berguna dalam produksi beton bermutu tinggi karena penambahan kuat tekan yang berlanjut pada jangka waktu yang lebih lama.

Agregat Kasar dan Agregat Halus

Dalam proporsi beton mutu tinggi, pencampuran agregat secara signifikan mempengaruhi kekuatan dan sifat struktural beton. Syarat agregat kasar yang memenuhi menurut Kardiyono Tjokrodimulyo (1992) adalah kerikil harus butir yang keras dan tidak berpori, agregat bersih dari unsur organik, kerikil tidak boleh mengandung kadar lumpur lebih dari 10% berat kering. Sedangkan pada Agregat halus yang baik tidak mengandung lumpur lebih besar 5% dari berat, terdiri dari butiran yang tajam dan keras, dan bervariasi, butirnya harus bersifat kekal tidak mudah hancur oleh pengaruh cuaca, dan tidak boleh mengandung bahan organik yang terlalu banyak.

c. Superplasticizer Tipe F

Pada beton mutu tinggi biasanya digunakan tipe F yaitu *High Range Water Reducing* (HRWR), yaitu bahan kimia yang berfungsi untuk mengurangi air sampai 12% atau lebih. Penggunaan *superplasticizer* diperlukan pada rancangan beton mutu tinggi karena kondisi faktor air semen (FAS) yang rendah. Penggunaan *superplasticizer* bertujuan untuk bisa mengontrol dan menghasilkan nilai *slump* yang optimal pada beton segar (*workable*) sehingga bisa dihasilkan kinerja pengecoran beton yang baik.

d. Air

Semua jenis air dapat digunakan dalam campuran beton. Hal yang harus diperhatikan pada penggunaan air adalah kejernihan air, dan bebas dari bahan yang merugikan minyak, alkali, garam, bahan organik yang dapat membahayakan beton (ACI 813-83).

2.3 Self-Healing Concrete

Salah satu alasan munculnya inovasi *self-healing concrete* yang dikembangkan oleh para ilmuwan adalah faktor biaya pada beton sebagai bahan yang banyak digunakan dalam pembangunan sebuah konstruksi [9]. Dikatakan *self-healing concrete* adalah karena beton dapat menyembuhkan retakan yang terjadi tanpa proses pemeliharaan ataupun pembaharuan yang dilakukan oleh tangan manusia. Dalam proses *healing* pada struktur beton didukung oleh adanya *self-healing agent* yang bereaksi dengan oksigen dan air saat terjadinya retakan, sehingga menghasilkan suatu senyawa kalsium karbonat (CaCO_3) yang berperan dalam proses perbaikan beton. Maka terbentuklah suatu inovasi beton yang bisa menyembuhkan dirinya sendiri, yaitu *bio-concrete*.

Self-healing agent pada beton, tidak hanya terdiri dari satu jenis saja. *Self-healing agent* yang digunakan dapat berbentuk produk kimia ataupun mikroorganisme, pada berbagai penelitian salah satunya Mokhtar dan Hasan (2021) *self-healing agent* yang berasal dari produk kimia tidak efektif untuk digunakan, karena dapat mengganggu kestabilan lingkungan [9] [11]. Kemudian, berkembang penelitian *self-healing agent* berupa fungi (jamur). Simpulan akhir dari penelitian Menon (2019) menerangkan bahwa beton adalah lingkungan yang ekstrem bagi pertumbuhan jamur [10]. Bersamaan dengan penelitian *self-healing agent* berupa jamur, berkembang juga *self-healing agent* berupa bakteri. Bakteri yang digunakan sebagai *self-healing agent* adalah bakteri yang harus tahan terhadap sifat alkalinitas beton yang memiliki pH tinggi. Dalam jurnal ISSN, *Analytical and Experimental Modal Analysis* menjelaskan tentang jenis-jenis bakteri yang tahan terhadap alkalinitas beton yang tinggi. Bakteri untuk penyembuhan retak terdiri dari *B. pasteurii*, *Deleya Halophila*, *Halomonasrurihalina*, *Myxococcus Xanthus*, dan *B. megaterium*. Bakteri untuk mengobati permukaan terdiri dari *B. sphaericus*. Sedangkan, pada kelompok *B. sphaericus* terbagi lagi ke dalam beberapa koloni, terdiri dari *B. subtilis*, *B. sphaericus*, *Thiobacillus*. Namun, dalam beberapa referensi menyebutkan bahwa bakteri terkuat ada pada genus *Bacillus* [2].

2.4 Bacillus megaterium

Bacillus megaterium mampu bertahan dalam beberapa kondisi lingkungan yang ekstrem seperti gurun karena membentuk spora. *Bacillus megaterium* dapat tumbuh pada suhu 30°C (Belma et al., 2000) sehingga digolongkan bakteri mesofilik, yaitu memiliki temperatur optimum untuk pertumbuhan berkisar 25-37°C dan dapat hidup pada pH 5,5-8.

Mikroorganisme bakteri ini mampu menghasilkan berbagai macam mineral seperti karbonat, sulfida, silikat, dan posfat. Hal ini membuktikan bahwa bakteri dapat digunakan sebagai *self-healing agent* karena dapat menghasilkan zat kapur/kalsium karbonat (CaCO_3) yang berperan penting dalam proses perbaikan beton. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa bakteri dengan genus *Bacillus* mampu memperbaiki keretakan pada beton [10], salah satunya *Bacillus megaterium*. Hal ini disebabkan karena bakteri tersebut dapat bertahan pada lingkungan ekstrem dengan kondisi pH tinggi. Menurut Schlegel (1993) bakteri pembentuk spora membran tebal ini dapat bertahan hidup tanpa nutrisi hingga ratusan tahun.

3. METODOLOGI

Metode yang diaplikasikan pada penelitian ini dibagi ke dalam dua bagian. Pertama, merumuskan studi literatur yang variabelnya diaplikasikan pada metode kedua, yaitu studi

eksperimental di laboratorium. Studi eksperimental dilakukan di 2 (dua) laboratorium berbeda, yaitu laboratorium bio-proses dan laboratorium bahan.

3.1 Laboratorium Bio-proses

Studi eksperimental yang dilakukan di laboratorium bio-proses adalah berupa pembuatan media pertumbuhan bakteri, inokulasi bakteri, sampai pada perhitungan populasi bakteri yang dicampurkan pada beton.

1. Pembuatan Media

Media yang digunakan terdapat 2 jenis, yaitu media NA (*Nutrient Agar*) dan media NB (*Nutrient Broth*). Media NA digunakan sebagai tempat pertumbuhan populasi bakteri sebelum dilakukan perhitungan populasi dan konsentrasi. Sedangkan, media NB digunakan sebagai tempat pertumbuhan bakteri setelah perhitungan populasi induk bakteri. Media NB sebagai media bakteri terakhir yang akan dicampurkan langsung pada campuran beton.

2. Perhitungan Konsentrasi Bakteri

Perhitungan konsentrasi bakteri dilakukan dengan metode hitung cawan. Perhitungan dimulai dari konsentrasi 10^{-1} – 10^{-6} , dimasukkan ke dalam larutan NaCl agar kondisi bakteri tetap stabil, tanpa kontaminasi. Larutan berisi bakteri tersebut kemudian dipindahkan ke dalam cawan petri, yang selanjutnya diinkubasi dalam inkubator, sehingga dapat ditentukan indukan dari bakteri yang diinokulasikan pada media NA dan media NB.

3. Inokulasi Bakteri

Proses inokulasi bakteri dilakukan pada 2 buah media, yaitu media NA dan media NB. Inokulasi pada media NA dilakukan untuk proses peremajaan bakteri dalam agar miring yang diambil dari indukan bakteri pada cawan petri. Sedangkan, inokulasi pada media NB dilakukan untuk menyiapkan bakteri yang siap dicampurkan ke dalam campuran beton berupa media cair yang jumlahnya sudah tertakar. Indukan bakteri yang digunakan untuk inokulasi pada media NB berasal dari indukan pada cawan petri.

3.2 Pembuatan Desain Campuran Mortar Geopolimer

Studi eksperimental yang dilakukan di laboratorium bahan memiliki beberapa tahap, yaitu pengujian pendahuluan pada agregat dan semen, pembuatan beton sesuai dengan rancangan *mix design*, pengujian sifat mekanis beton, serta analisis pengamatan *self-healing* yang menjadi *output* dari penelitian ini.

1. Pengujian Pendahuluan

Terdapat enam jenis pengujian pendahuluan yang dilakukan. Pertama, pengujian analisis saringan agregat yang menggunakan standar ASTM C136-96, SNI 03-1968-1990, dan ASTM C 33-03. Dari pengujian ini didapatkan gradasi agregat dan nilai FM (*Finenes Modulus*) baik itu pada agregat kasar maupun agregat halus. Kedua, pengujian berat jenis dan penyerapan air dengan standar SNI 1969-2008 untuk agregat kasar dan SNI 1970-2008 untuk agregat halus. Dari pengujian ini, didapatkan nilai berat jenis kondisi SSD, kering, dan semu pada agregat halus maupun agregat kasar. Ketiga, terdapat pengujian bobot isi dengan standar acuan ASTM C.29/C.29M-1997 dan SNI-03-4804-1998. Dari pengujian ini dihasilkan nilai bobot isi baik dalam kondisi gembur maupun padat. Keempat, pengujian kadar lolos 200 yang menggunakan standar acuan SNI 03-4142-1996. Kelima, pengujian kadar organik yang diujikan pada agregat halus dengan standar acuan ASTM C-40-92 dan SNI 03-2816-1992. Keenam, dilakukan pengujian berat jenis semen pada semen OPC tipe I yang mengacu pada SNI 15-2531-1991 dan ASTM C.150.

2. Pembuatan Beton

Beton yang dicampurkan merupakan hasil rancangan ACI 211 4R-93 dengan mutu beton rencana 45 MPa. Rancangan ini menerapkan substitusi semen oleh *fly ash* sebesar 25% dan ditambahkan pula *admixture* berupa *superplasticizer* sebanyak 0,6% dari jumlah keseluruhan semen dan *fly ash*. Faktor air semen didapatkan 0,38 dan kadar udara rencana ditetapkan sebesar 1%. Nilai maksimum ukuran agregat kasar didapatkan 25mm serta dilakukan treatment pada agregat halus dan ditetapkan ukuran maksimum adalah 1,18 mm.

Pencampuran beton dilakukan dengan metode yang mengacu pada SNI 03-3976-1995. Perlakuan yang berbeda diterapkan pada beton bakteri, dimana terdapat penambahan campuran berupa larutan berisi bakteri sebanyak 2% dari keseluruhan jumlah air, serta serbuk kalsium laktat sebanyak 2% dari keseluruhan jumlah semen. Dilakukan pula pengujian beton segar, yaitu *slump flow* dengan berdasar pada standar ASTM C 1611M-05 dengan nilai *slump* berdiameter 40 – 60cm [4].

3. Inokulasi Bakteri

Pengujian yang diterapkan pada beton adalah pengujian kuat tekan. Pengujian ini diaplikasikan pada benda uji silinder berdiameter 10 cm dengan tinggi 20 cm yang diujikan pada umur 7 dan 28 hari. Jumlah benda uji beton kontrol dan beton bakteri adalah 2 buah pada setiap umurnya. Standar acuan yang digunakan adalah SNI 03-4154-1996 dan ASTM C 78.

4. Analisis Pengamatan *Self-Healing*

Analisis Pengamatan *self-healing* pada beton dilakukan dengan pengamatan secara visual untuk melihat bagaimana proses penyembuhan retakan yang dapat diperbaiki bakteri. Sampel yang telah diuji direndam ulang ke dalam bak curing seperti yang terlihat pada **Gambar 1** dan kemudian diamati dalam beberapa hari tertentu untuk melihat perkembangannya.



Gambar 1. Bak curing

4. ANALISIS DATA DAN HASIL

4.1 Hasil Pengujian Pendahuluan

Pada pengujian pendahuluan, dilakukan pengujian sifat fisis material pada agregat kasar, agregat halus, dan semen. Hasil dari pengujian ini diperlukan untuk memastikan bahan yang akan digunakan dalam pembuatan campuran beton sudah memenuhi spesifikasi sehingga diperoleh rancangan *mix design* yang baik dan tercapai sesuai mutu rencana. Hasil pengujian pendahuluan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Pengaruh Bakteri Bacillus Megaterium sebagai Self-Healing Agent pada Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi

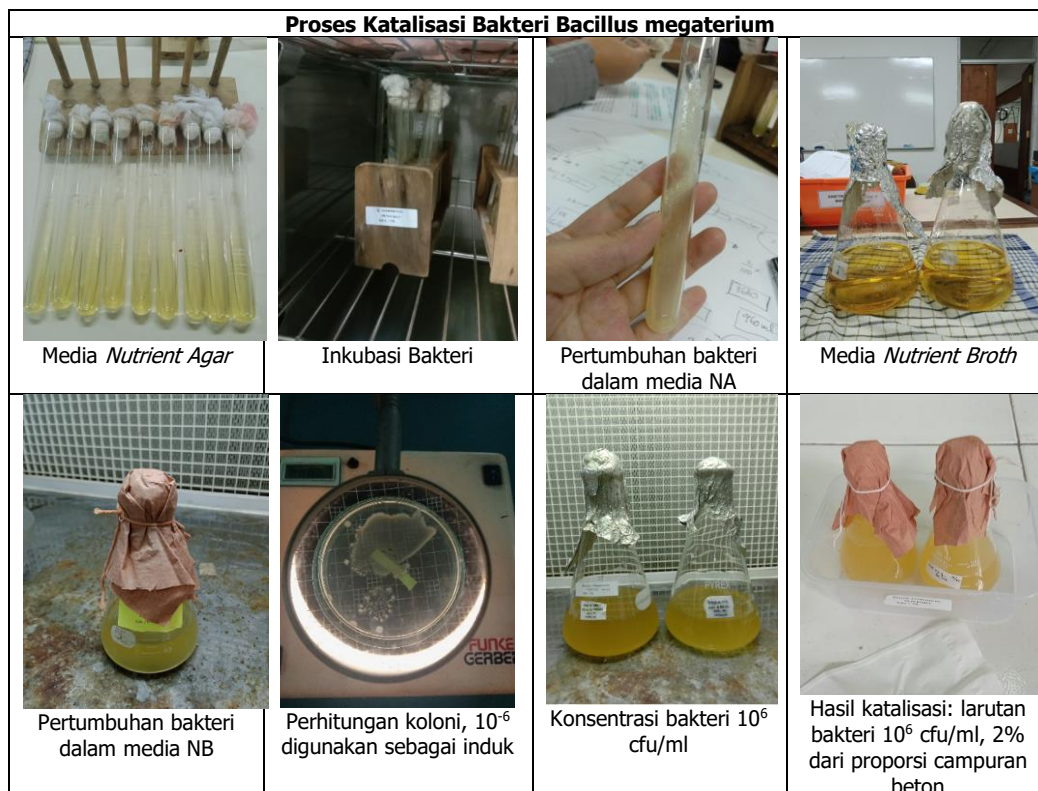
Tabel 1. Pengujian Sifat Fisis Material

No	Jenis Pengujian	Satuan	Standar Uji	Hasil	Spesifikasi		Standar Spesifikasi	KET
					Min.	Maks.		
1	Berat Jenis dan Penyerapan							
	a. Agregat Kasar							
	Berat Jenis: SSD	gram/cc		2,70	-	-		
	Berat Jenis: Kering Oven	gram/cc	ASTM C.127-1997/ SNI 03-1969-2008	2,66	-	-		
	Berat Jenis: Apparent Penyerapan Air	gram/cc %		2,78 1,72	-	-		
	b. Agregat Halus							
	Berat Jenis: SSD			2,56	-	-		
	Berat Jenis: Kering Oven		ASTM C.128-1997/ SNI 03-1970-2008	2,40	-	-		
	Berat Jenis: Apparent Penyerapan Air	gram/cc %		2,84 6,46	-	-		
	2	Bobot Isi						
a. Agregat Kasar								
Bobot Isi Gembur		gram/cm ³	ASTM C.29/C29M 09/ SNI 03-4804-1998	1,35	-	-		
Bobot Isi Padat		gram/cm ³		1,53	-	-		
b. Agregat Halus								
Bobot Isi Gembur		gram/cm ³	ASTM C.29/C29M 09/ SNI 03-4804-1998	1,51	-	-		
3	Analisis Saringan							
	a. Agregat Kasar							
	Finenes Modulus (FM)	-	ASTM C.136-1996/ SNI 03-1968-1990	7,016	6	7,1	ASTM C 33 / SK SNI S-04-1989	Memenuhi
	Nominal Maximum Size	mm		25	-	-	SNI-03-6468-2000	Disyaratkan 20 atau 25 mm
	b. Agregat Halus							
	Finenes Modulus (FM)	-	ASTM C.136-1996/ SNI 03-1968-1990	2,569	2,3	3,1	ASTM C 33 / SK SNI S-04-1989	Memenuhi
Nominal Maximum Size	mm		1,18	-	-	SNI-03-6468-2000	Disyaratkan 20 atau 25 mm	
4	Kadar Lolos 200							
	a. Agregat Kasar							
	Nilai Bahan Lolos 200	%	SNI 03-4142-1996	0,92	-	1	ASTM C.33-95	Memenuhi Spek
	b. Agregat Halus							
Nilai Bahan Lolos 200	%	SNI 03-4142-1996	4,08	-	5	ASTM C.33-95	Memenuhi Spek	
5	Kadar Organik							
	a. Agregat Halus							
Kadar Organik	Visual Warna	ASTM C 40-92/SNI 03-2816-1992	no.1			ASTM C40/C40-M 19	Sangat Baik	
6	Berat Jenis Semen							
	Berat Jenis Semen		ASTM C.188 dan SNI 15 2531 1991.	3,00	3,00	3,20	SNI 15 7064 2004	Memenuhi, semen termasuk Tipe I-V

4.2 Hasil Katalisasi Bakteri *Bacillus megaterium*

Diperoleh pertumbuhan populasi Bakteri *Bacillus megaterium* sesuai hasil perhitungan melalui metode hitung cawan dengan konsentrasi 10⁻⁶ cfu/ml. Bakteri tersebut dimasukkan ke dalam erlenmeyer yang telah dibagi persentasenya berdasarkan proporsi campuran beton yang akan dibuat. Uraian proses katalisasi tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Katalisasi Bakteri *Bacillus megaterium*



4.3 Rancangan Mix Design ACI 211-4r-93

Berdasarkan perhitungan per 1 m³ *mix-design* dengan standar acuan ACI211-4r 93 (**Tabel 3**), didapatkan proporsi campuran beton dengan kuat tekan rencana 45 MPa yang disesuaikan dengan kebutuhan jumlah benda uji (**Tabel 4**). Selain itu dilakukan juga perhitungan pada jumlah bakteri 2% dan kalsium laktat 2% dari berat semen yang hasilnya dilampirkan pada tabel yang sama.

Tabel 3. Proporsi 1 m³ Mix Design ACI 211-4r-93

Campuran per 1m ³	Semen Portland (kg)	Fly Ash (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Air (kg)	Sp 0,6% (kg)	Bakteri 2% (kg)	Kalsium Laktat (kg)
Campuran 3 #25%	321,623	107,208	698,323	1155,616	128,249	2,573	2,565	6,432

Tabel 4. Mix Design ACI 211-4r-93 sesuai Kebutuhan Benda Uji

Benda Uji	Ukuran	Jumlah	Semen (kg)	Fly Ash (kg)	Agg.Kasar (kg)	Agg.Halus (kg)	Air (kg)	Sp 0.6%	Bakteri 2%	Kalsium Laktat
Silinder	10 x 20 cm	8	4,042	1,347	14,522	8,775	1,612	0,032	0,032	0,081

4.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui nilai beban maksimum tekan yang dapat diterima oleh setiap benda uji, kemudian dilakukan perhitungan sehingga diperoleh nilai kuat tekan dalam satuan MPa. Perhitungan nilai kuat tekan mengacu pada **Persamaan 2**, dengan *P* merupakan beban tekan maksimum dalam satuan kN dan *A* merupakan luas bidang tekan dalam satuan cm².

$$f_{ci} = \frac{P}{A} \quad \dots(2)$$

*Pengaruh Bakteri Bacillus Megaterium sebagai Self-Healing Agent pada
Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi*

Pengujian ini dilakukan pada umur beton 7 hari (**Tabel 5**) dan umur beton 28 hari (**Tabel 6**). Kemudian diperoleh peningkatan seperti yang terlihat pada **Tabel 7** dan digambarkan lebih jelas pada diagram yang terlihat pada **Gambar 2**.

Tabel 5. Kuat Tekan Umur 7 Hari

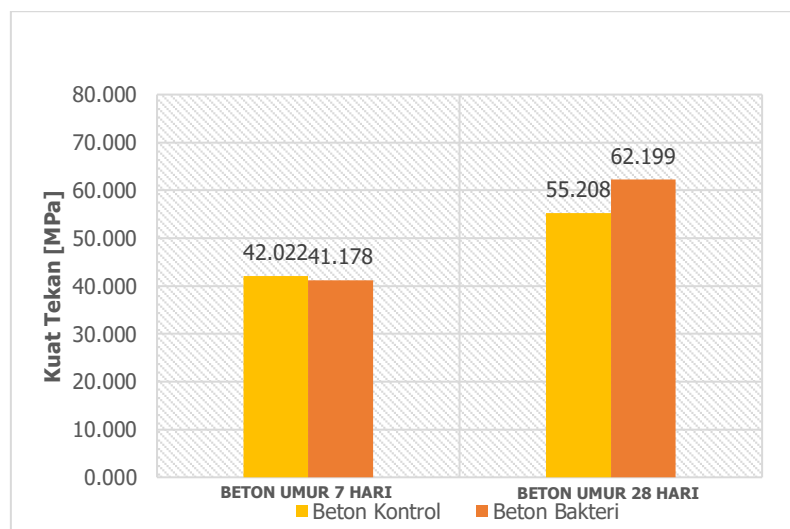
Jenis Spesimen		Dimensi Sampel		Beban Maksimum	Luas	Kuat Tekan (σ_c)	Rata-rata Kuat Tekan (f'_{cr})
		D	T				
		[mm]	[mm]				
Beton Kontrol	1	100,16	200,15	350	78,751	44,444	42,022
	2	99,86	200,42	310	78,280	39,601	
Beton Bakteri 2%	1	99,90	199,27	328	78,338	41,870	41,178
	2	100,34	199,46	320	79,039	40,486	

Tabel 6. Kuat Tekan Umur 28 Hari

Jenis Spesimen		Dimensi Sampel		Beban Maks	Luas	Kuat Tekan (σ_c)	Rata-rata Kuat Tekan (f'_{cr})
		D	T				
		[mm]	[mm]				
Beton Kontrol	1	100,35	199,76	425	79,046	53,766	55,208
	2	100,03	200,45	445	78,552	56,651	
Beton Bakteri 2%	1	100,51	199,10	485	79,307	61,154	62,199
	2	99,85	199,76	495	78,269	63,243	

Tabel 7. Rekapitulasi Nilai Kuat Tekan

Jenis Spesimen	Umur [MPa]	
	7 Hari	28 Hari
Beton Kontrol	42,022	55,208
Beton Bakteri 2%	41,178	62,199
Peningkatan Yang Terjadi	-2,01%	12,66%



Gambar 2. Perbandingan kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari

Dapat dilihat pada **Tabel 7** terdapat perbedaan hasil antara beton 7 hari dan beton dengan umur 28 hari, maka analisis yang diperoleh dari peningkatan dan penurunan yang terjadi adalah sebagai berikut:

Penurunan

1. Beton bakteri umur 7 hari memiliki nilai kuat tekan yang lebih rendah dibanding beton kontrol. Hal ini dapat terjadi karena umur perawatan beton yang belum lama, sehingga bakteri dalam beton belum sepenuhnya bereaksi dan kandungan yang dihasilkan sebagai peningkat kekuatan beton yaitu kalsium karbonat (CaCO_3) yang dihasilkan oleh bakteri belum tumbuh optimal.
2. Penambahan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen berpengaruh pada masa pengikatan beton yang lebih lambat dibanding semen, sehingga berpengaruh pada nilai kuat tekan beton itu sendiri.

Penurunan

1. Segi umur perawatan yang optimal, sehingga pada umur 28 hari *fly ash* sudah mulai mengikat dan mempengaruhi peningkatan kekuatan beton.
2. Bakteri sudah mulai tumbuh secara optimal dan menghasilkan CaCO_3 yang lebih banyak sehingga dapat meningkatkan kuat tekan beton.

4.5 Analisis Pengamatan *Self-Healing*

Pengamatan visual dilakukan pada keretakan beton pasca pengujian sampai hari ke-55 pada beton umur 7 hari. Bakteri mulai bekerja menutupi retakan pada saat hari ke-21 pasca pengujian. Dapat diamati pada **Gambar 3** lebar retakan mikro yang berhasil diperbaiki bakteri selama pengamatan sampai hari ke-55 tersebut adalah sebesar 0,66 – 2,76 mm.



Gambar 3. Pengamatan *self-healing* pada beton hari ke-55 pasca pengujian

5. KESIMPULAN

Hasil rancangan *mix design mengacu* pada pedoman ACI 211.4r-93 dengan mutu beton rencana 45 MPa dalam 1 m^3 memiliki proporsi, semen 321,623 kg; *fly ash* 107,208 kg; agregat kasar 1.155,616 kg; agregat halus 698,323 kg; air + *admixture* 128 kg; bakteri 2.565,98 ml; dan kalsium laktat 6,433 kg. Kemudian, didapatkan nilai kuat tekan pada beton bakteri mengalami penurunan sebesar -2,01% terhadap beton kontrol di umur 7 hari. Sedangkan, pada umur 28 hari kuat tekan beton bakteri meningkat sebesar 12,66% terhadap beton kontrol. Oleh karena itu, dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan bakteri sebagai *self-healing agent* berpengaruh signifikan pada peningkatan nilai kuat tekan. Terdapat persamaan hasil dengan penelitian sebelumnya yang menjadi rujukan [9] menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan sebesar 15,86%. Dapat diketahui bahwa persentase peningkatan beton mutu tinggi cenderung lebih kecil, hal ini disebabkan oleh karakteristik beton mutu tinggi yang sudah padat dan minim rongga sebelum ditambahkan bakteri.

Selain itu, didapatkan hasil analisis visual yang dilakukan selama 55 hari pasca pengujian, bahwa bakteri dapat mulai bekerja untuk menutupi retakan mikro pada hari ke-21 pasca

pengujian dan lebar retakan yang dapat diperbaiki selama pengamatan tersebut berkisar antara 0,66 – 2,76 mm. Berdasarkan hasil di atas, dapat dibuktikan bahwa bakteri dapat tetap hidup dan bekerja dalam rancangan beton mutu tinggi.

5. SARAN

Dari hasil penelitian ini, dirumuskan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya. Yang pertama, perlu ditambahkan beberapa variabel persentase bakteri untuk mengetahui variabel konsentrasi optimum bakteri yang dapat bekerja. Yang kedua adalah perlu adanya penambahan variabel persentase *fly ash* dan *superplasticizer* untuk mengetahui campuran beton yang optimum sesuai dengan mutu rencana. Kemudian, perlu dilaksanakannya pengujian tambahan yang dapat mendeteksi cara kerja CaO atau zat kapur dengan adanya pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) atau EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*). Yang terakhir adalah perlu dilakukan penelitian visual dengan umur beton lebih lama agar dapat diketahui kemampuan bakteri bertahan dalam beton.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abdullah, M. A. H., Abdullah, N. A. H. dan Tompong, M. F. (2018). Development and Performance of Bacterial Self-healing Concrete - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(062003), 1-9.
- [2] Alisha, S. R. (2020). Self-Healing Concrete Using Bacteria. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, XII(VII), 3164-3170.
- [3] Andalib, R., et al. (2016). Optimum concentration of Bacillus megaterium for strengthening structural concrete. *Construction and Building Materials*, 118(____), 180-193.
- [4] Asraar, I., et al. (2016). Studi Perancangan Beton Hemat Energi (Self Compacting Concrete) untuk Beton Normal, $f_c' = 25\text{MPa}$ dengan Metode ACI Modifikasi. *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil dan Tambang*, 1(1), 1-10.
- [5] Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-6468-2000 tentang Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- [6] Grino, A. A. (2020). Bio-influenced self-healing mechanism in concrete and its testing: A review. *Applied Sciences*, 10(5161), 1-18.
- [7] Jonkers, H. M. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230-235.
- [8] Joy, M. d. (2018). Experimental Study on Strength Characteristics of Self – Healing Concrete with Fly Ash. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(6), 1-4.
- [9] Kamran, S. (2022). *Self-Healing Concrete. Experiment Findings*. Ankara: TED Universitesi.
- [10] Menon, R. R. (2019). Screening of Fungi for Potential Application of Self-Healing Concrete. *Scientific Reports*, 9(1), 1-12.
- [11] Mokhtar, N. d. (2021). Performance of Sodium Silicate as Self-Healing Agent on Concrete Properties: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1144(1), 012024.
- [12] Nain, N. S. (2019). Enhancement in strength parameters of concrete by application of Bacillus bacteria. *Construction and Building Materials*, 202(____), 904-908.
- [13] Reddy, P. V. Y., Ramesh, B. dan Kumar, L. P. (2020). Influence of bacteria in self healing of concrete - a review. *33(7)*, 4212-4218.
- [14] Seifan, M. S. (2016). Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(6), 2591-2602.

- [15] Su, Y. Z. (2021). Application potential of *Bacillus megaterium* encapsulated by low alkaline sulphoaluminate cement in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 273(____), 1-13.
- [16] Vijay, K. M. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 152(____), 1008-1014.