



## KUAT TEKAN PADA CAMPURAN BETON DENGAN BAKTERI YANG DIINOKULASI DAN LIMBAH BENDA UJI

Muhammad Rayhan Asy Syukri<sup>1)</sup>, Wulan Maharani<sup>1)</sup>, Luthfi Muhammad Mauludin<sup>1)</sup>, Iin Karnisah<sup>1)</sup>, Yulianto Petrus Krisologus<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia  
Surel: <sup>1)</sup>luthfi-mm@polban.ac.id

### ARTIKEL INFO

#### Kata Kunci:

*Bacillus megaterium*, beton normal, kuat tekan, limbah beton, self-healing concrete.

#### Keywords:

*Bacillus megaterium*, compressive strength, regular concrete, self-healing concrete, waste concrete.

#### ABSTRACT

Concrete is a material commonly used as road and bridge structure and is very prone to cracking in hard-to-reach areas. Innovation in the form of self-healing concrete (SHC) can repair its cracks. Meanwhile, concrete waste remains a challenge that needs to be addressed and utilized to reduce the reliance on natural materials. This study utilizes *Bacillus megaterium* bacteria as a self-healing agent and concrete waste as a substitute for coarse aggregate applied in regular concrete (20 MPa) with a mix design based on ACI 211.1-91. Variations in bacterial content are 2% and 4% of the weight of water, and variations in concrete waste are 25%, 50%, and 75% of the weight of coarse aggregate with a substitution of 10% fly ash and 2% calcium lactate of the weight of cement. The results showed an increase in compressive strength of 5.39% from 21.5 MPa for waste concrete to 20.4 MPa but a decrease of 0.46% from 21.6 MPa for regular concrete. Then, the bacteria showed self-healing or covered the cracks on the seventh day after testing. Additionally, the bacteria were able to restore the strength of the concrete by 80.22% to 99.19% after retesting on the 28th day. Therefore, concrete with bacteria based on concrete waste has the potential to be applied to road and bridge construction.

DOI: 10.58499/jatan.v42i1.1306

diterima: 08 Juli 2024 ;

direvisi: 30 Mei 2025;

disetujui: 31 Mei 2025

### PENDAHULUAN

Beton merupakan suatu material yang biasa digunakan pada konstruksi meskipun sangat rentan terhadap retakan. Apabila retakan terjadi pada area yang sulit untuk dijangkau, pelaksanaan *maintenance* pasca konstruksi akan membutuhkan biaya serta waktu yang cukup banyak (Van Tittelboom dan De Belie 2013). Dengan demikian, terdapat teknologi yang mampu untuk mengatasi permasalahan tersebut, yaitu dengan *self-healing concrete* atau beton yang mampu memperbaiki sendiri keretakannya (Herlambang dan Saraswati 2017).

Konsep dari penerapan *self-healing* pada beton yaitu dengan memanfaatkan bakteri untuk menghasilkan suatu reaksi yang disebabkan oleh adanya air dan oksigen sehingga akan mengaktifkan spora pada bakteri. Kemudian, spora tersebut akan bereaksi untuk mengubah kalsium laktat ( $\text{CaC}_6\text{H}_{10}\text{O}_6$ ) menjadi batu kapur (*limestone*) yang merupakan endapan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) (Tziviloglou dkk. 2016). Adapun konsep dari proses *self-healing*, yaitu seperti berikut:



Apabila beton mengalami retak, keberadaan bakteri *Bacillus megaterium* sebagai *self-healing agent* akan aktif dari hibernasinya dan kalsium laktat pada campuran beton akan membantu bakteri yang sudah aktif dalam memperbaiki dan mengisi celah yang ada atau disebut dengan proses *self-healing* pada beton (Savira 2022). Setelah retakan terisi oleh endapan kalsium karbonat, bakteri akan kembali hibernasi dan akan kembali aktif apabila terjadi retakan kembali (Rahmawan dkk. 2021). Pemanfaatan *self-healing concrete* di bidang infrastruktur, terutama pada jalan dan jembatan masih belum dimanfaatkan secara optimal. Infrastruktur yang menggunakan struktur beton biasanya memiliki kelebihan terhadap kekuatan tekannya (Paglia 2024).

Penggunaan bakteri *Bacillus megaterium* merupakan salah satu jenis bakteri yang dapat meningkatkan kekuatan pada beton hingga 48% (Rahmawan dkk. 2021). Penggunaan bakteri juga dapat mengembalikan kekuatan tekan beton sebesar 50,58% s.d. 65,91% (Orozco dan Urbino 2022).

Jalan dan jembatan sebagai infrastruktur transportasi menjadi salah satu area implementasi struktur beton yang rentan terhadap kerusakan. Kerusakan biasanya disebabkan oleh beban lalu lintas berulang yang berlebihan atau mutu rencana yang tidak sesuai (Putra dan Abdillah 2020).



Jika teknologi *self-healing concrete* diaplikasikan pada suatu bangunan, maka proses *repair and maintenance* pada bangunan akan menjadi lebih mudah terutama apabila retakan mikro terjadi pada area yang sulit untuk dijangkau (Fauziah dkk. 2023).

Berdasarkan hasil penelitian Jakobovskis dan Boris (2022), penggunaan *self-healing concrete* yang diaplikasikan pada struktur jembatan untuk pejalan kaki atau sering disebut sebagai *footbridge* menghasilkan proses *self-healing* pada beton yang mengalami retak. Selain itu, adanya penggunaan material *self-healing concrete* dapat menjadi daya tarik dalam meningkatkan minat terhadap penggunaan material yang mampu untuk menyembuhkan sendiri keretakannya dan menjadi beton yang lebih ramah lingkungan (Amran et al. 2022).

Namun, dengan banyaknya penelitian terhadap beton, muncul permasalahan baru yaitu penumpukan beton yang sudah tidak terpakai terutama limbah beton yang dihasilkan dari penelitian terhadap beton. Jika hal tersebut terjadi tanpa dilakukannya penanggulangan terhadap limbah beton, limbah tersebut akan menumpuk dan akan mempersempit lahan, khususnya area laboratorium. Oleh karena itu, penggunaan limbah beton bisa menjadi suatu alternatif yang dimanfaatkan untuk menjadikan limbah beton sebagai agregat daur ulang (*recycled aggregate*) dan mengurangi penggunaan material alam (Tayeh, Saffar, dan Alyousef 2020).

Berdasarkan penelitian Kurniawan dan Putra (2023) terhadap *recycled aggregate*, digunakan persentase agregat daur ulang yaitu 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Penggunaan agregat kasar dari material daur

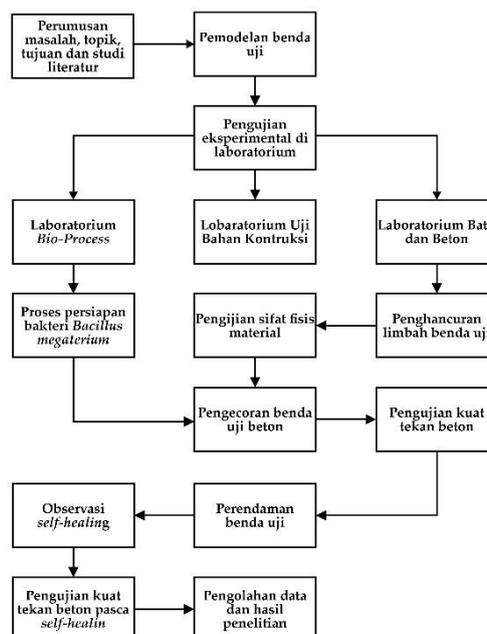
ulang dapat menyebabkan pengurangan kuat tekan jika dibandingkan dengan beton normal tanpa menggunakan material daur ulang (Sara Shomal Zadeh dkk. 2023). Dengan pertimbangan tersebut, penelitian ini menggunakan bakteri *Bacillus megaterium* sebagai salah satu material penyusun beton yang dapat berfungsi untuk meningkatkan kekuatan beton sehingga kuat tekan beton yang semula rendah dapat dioptimalkan karena peran bakteri sebagai *self-healing agent*.

## HIPOTESIS

Hipotesis dalam penelitian ini yaitu dengan adanya penambahan limbah beton yang dikombinasikan dengan penggunaan bakteri mampu menciptakan suatu campuran beton yang menghasilkan mutu beton khususnya nilai kuat tekan beton yang minimal setara atau lebih dari campuran beton normal. Selain itu, proses *self-healing* pada beton dapat memulihkan kekuatan tekan beton hingga mendekati nilai kuat tekan sebelum proses *self-healing*.

## METODOLOGI

Penelitian ini termasuk ke dalam jenis penelitian eksperimental dengan skala model di laboratorium. Pelaksanaan penelitian berada di beberapa laboratorium, yaitu Laboratorium Bio-Proses, Laboratorium Uji Bahan Kontruksi, dan Laboratorium Batu dan Beton. Adapun diagram alir penelitian ini dapat dilihat seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

### Pemodelan Benda Uji

Variasi persentase kadar bakteri *Bacillus megaterium* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2% dan 4% dari berat air. Variasi limbah beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25%, 50%, dan 75% dari berat agregat kasar. Adapun substitusi

penggunaan semen dengan *fly ash* sebesar 10% dan kalsium laktat sebesar 2% dari berat semen.

Jumlah benda uji setiap variasi adalah sebanyak 3 buah untuk setiap pengujian 14 dan 28 hari. Adapun perincian pemodelan benda uji dapat dilihat seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Pemodelan benda uji

Variasi	Kadar Bakteri	Kadar Limbah Beton	Jumlah (Buah)
NC	0%	0%	6
RCA	0%	100%	6
B2R25	2%	25%	6
B2R50	2%	50%	6
B2R75	2%	75%	6
B4R25	4%	25%	6
B4R50	4%	50%	6
B4R75	4%	75%	6

### Laboratorium Bio-Proses

Bakteri *Bacillus megaterium* disiapkan dengan pembuatan media berupa *Nutrient Agar* (NA) dan *Nutrient Broth* (NB) (Gambar 2). Bakteri kemudian akan

dikembangbiakkan pada media NA untuk selanjutnya diinokulasi terhadap NB untuk dicampurkan pada campuran beton sesuai dengan persentase yang dibutuhkan terhadap kebutuhan air.



Gambar 2. Persiapan bakteri *Bacillus megaterium*

### Laboratorium Batu dan Beton

Limbah beton diambil secara acak dan berasal dari limbah beton berbentuk silinder (15 x 30) cm. Proses penghancuran limbah beton dilakukan sampai

menghasilkan cacahan agregat yang menyerupai dengan bentuk agregat kasar yang sudah ada (Gambar 3).



Gambar 3. Penghancuran limbah beton menggunakan *stone crusher*

## Laboratorium Uji Bahan Konstruksi

Terdapat beberapa pengujian yang dilakukan, di antaranya, analisis ayak agregat, berat jenis dan penyerapan air agregat, kadar no. 200 agregat, kadar air agregat, kadar organik agregat, berat jenis semen dan *fly ash*, dan uji keaktifan bahan *fly ash*. Selanjutnya campuran beton dirancang berdasarkan ACI 211.1-91 dengan mutu rencana 20 MPa. Proses pencampuran beton mengikuti prosedur yang dijelaskan sesuai dengan SNI 03-3976-1995. Adapun pengujian beton segar berupa *slump test* berdasarkan SNI 1972-2008 dengan nilai *slump* rencana 75 s.d. 100 cm dan bobot isi beton segar berdasarkan SNI 03-1973-1990. Pengujian kuat tekan diterapkan pada sampel silinder dengan ukuran (15 x 30) cm yang berdasarkan pedoman SNI 1974-2011 dan ASTM C39. Proses *self-healing* diamati pada keretakan beton pascapengujian kuat tekan. Pengamatan dilakukan secara berkala, yaitu per 7 hari sampai hari ke-28 untuk sampel beton berumur 28 hari.

Terakhir pengujian dilakukan terhadap silinder beton yang sudah di-*curing* selama 28 hari sejak pengujian kuat tekan beton awal. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh bakteri *Bacillus megaterium* dalam mengembalikan kekuatan beton.

## HASIL DAN ANALISIS

### Hasil Pengujian Pendahuluan Material

Hasil pengujian pendahuluan dilakukan untuk memastikan bahwa material penyusun beton sudah memenuhi standar sehingga *mix design* dapat tercapai dan sesuai dengan mutu yang direncanakan.

### Agregat

Hasil pengujian pendahuluan material beton pada agregat kasar, halus, dan agregat limbah beton dapat dilihat seperti pada Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4.

Tabel 2. Hasil pengujian agregat kasar

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
<i>Fine Modulus</i> (FM)	6,98	6,0–7,1
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,56	2,5–2,8
Berat jenis <i>bulk</i> (gr/cc)	2,50	2,5–2,8
Berat jenis <i>apparent</i> (gr/cc)	2,66	2,5–2,8
Penyerapan air (%)	2,40	0,2–4,0
Kadar lolos no. 200 (%)	2,27	maks. 1
Bobot isi gembur (gr/cm <sup>3</sup> )	1,47	-
Bobot isi padat (gr/cm <sup>3</sup> )	1,35	-
Kadar air (%)	2,02	0,5–2,0

Tabel 3. Hasil pengujian agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
<i>Fine Modulus</i> (FM)	2,68	2,3–3,1
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,51	1,6–3,3
Berat jenis <i>bulk</i> (gr/cc)	2,35	1,6–3,3
Berat jenis <i>apparent</i> (gr/cc)	2,79	1,6–3,3
Penyerapan air (%)	6,86	0,2–2,0
Kadar lolos no. 200 (%)	3,53	maks. 5
Bobot isi gembur (gr/cm <sup>3</sup> )	1,63	-
Bobot isi padat (gr/cm <sup>3</sup> )	1,58	-
Kadar air (%)	10,39	3,0–5,0
Kadar organik	no. 1	-

Tabel 4. Hasil pengujian agregat limbah beton

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
<i>Fine Modulus</i> (FM)	6,88	6,0–7,1
Berat jenis SSD (gr/cc)	2,35	2,5–2,8
Berat jenis <i>bulk</i> (gr/cc)	2,23	2,5–2,8
Berat jenis <i>apparent</i> (gr/cc)	2,53	2,5–2,8
Penyerapan air (%)	5,31	0,2–4,0
Kadar lolos no. 200 (%)	3,05	maks. 1
Bobot isi gembur (gr/cm <sup>3</sup> )	1,29	-
Bobot isi padat (gr/cm <sup>3</sup> )	1,16	-

## Semen

Semen yang digunakan pada penelitian ini ialah semen Tiga Roda dengan tipe PCC (*Portland Composite Cement*). Penggunaan PCC pada penelitian ini dirancang untuk pembuatan beton yang lebih kuat,

tahan lama, dan ramah lingkungan karena menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan tipe semen lainnya. Hasil pengujian pendahuluan material beton pada semen dapat dilihat seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian semen

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis semen	2,85	3,0–3,2

## Fly Ash

*Fly ash* yang digunakan pada penelitian ini ialah

*grade F*. Hasil pengujian pendahuluan material beton pada *fly ash* dapat dilihat seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengujian *fly ash*

Jenis Pengujian	Hasil	Syarat
Berat jenis <i>fly ash</i>	2,85	min. 2,0
Keaktifan bahan	2,0	2,0

## Hasil Rancangan *Mix design* ACI 211.1-91

Hasil perhitungan kebutuhan material beton per 1m<sup>3</sup> dan yang sudah disesuaikan dengan jumlah benda uji berdasarkan *mix design* yang mengacu ACI 211.1-91 dapat dilihat seperti pada Tabel 7. Adapun perhitungan kebutuhan 0,331 m<sup>3</sup> yang digunakan dalam penelitian ini dilebihkan 30% guna mengantisipasi adanya

penggunaan material yang tidak efisien, seperti material yang terbuang atau tidak digunakan secara optimal. Jumlah kebutuhan tersebut diperlukan untuk membuat 48 buah benda uji silinder. Proporsi campuran dirancang untuk kuat tekan rencana mutu beton normal (20 MPa).

Tabel 7. Kebutuhan material penyusun beton

Jenis Material	Berat Bahan (kg)	Berat Bahan (kg)
	Proporsi 1m <sup>3</sup>	Proporsi 0,331m <sup>3</sup>
Semen <i>Portland</i>	378,06	125,06
Air	186,07	61,55
Agregat halus	613,75	203,03
Agregat kasar	932,57	308,50
Limbah beton 25%	233,14	77,12
Limbah beton 50%	466,28	154,25
Limbah beton 75%	699,42	231,37
<i>Fly Ash</i> 10%	37,80	12,50
Bakteri 2%	3,72	1,23
Bakteri 4%	7,44	2,46
Kalsium laktat	7,56	2,50

## Hasil Pengujian Beton Segar

Pengujian dilakukan terhadap beton segar dan dilaksanakan saat proses pengecoran berlangsung.

Adapun hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat seperti pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Hasil pengujian agregat limbah beton

Kode Sampel	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Rerata (cm)
NC	6	11	9	8,67
RCA	6	12	11	9,67
B2R25	9	11	10	10
B2R50	7,50	7,50	10	8,33
B2R75	9,50	8,50	9	9
B4R25	9	9	9,50	9,12
B4R50	10	10	10	10
B4R75	4,50	7,50	10,50	7,50

Keterangan:

H1 : Tinggi penurunan beton di titik ke-1 (cm)

H2 : Tinggi penurunan beton di titik ke-2 (cm)

H3 : Tinggi penurunan beton di titik ke-3 (cm)

Berdasarkan hasil pengujian di atas, dapat disimpulkan bahwa pengujian *slump* beton segar sudah memenuhi persyaratan yaitu 7,5 s.d. 10 cm.

**Tabel 9.** Hasil uji bobot isi beton segar

Analisis Berat Isi Beton	Berat Bahan (kg)
Berat isi beton segar rencana (gr/cm <sup>3</sup> )	2,345
Berat isi beton segar aktual rata-rata (gr/cm <sup>3</sup> )	2,302
Nilai Rendeman	1,019

Karena nilai rendemen  $0,98 < 1,019 < 1,02$ , maka nilai rendemen beton segar sudah memenuhi persyaratan dan proporsi bahan tidak perlu dilakukan koreksi.

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:  
 $f'_c$  : Kekuatan tekan pada beton (MPa)  
 $P$  : Gaya tekan maksimum (N)  
 $A$  : Luas penampang benda uji (mm<sup>2</sup>)

**Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder**

Pengujian dilakukan terhadap silinder beton yang sudah di-*curing* selama 14 dan 28 hari menggunakan persamaan berikut.

Hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat seperti pada Tabel 10.

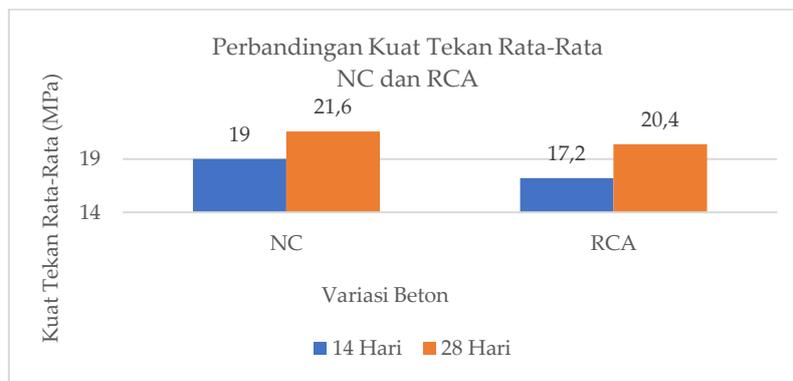
**Tabel 10.** Hasil pengujian kuat tekan silinder

Kode Sampel	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)	
	14 Hari	28 Hari
NC	19,00	21,60
RCA	17,20	20,40
B2R25	18,10	21,50
B2R50	17,40	20,50
B2R75	19,70	20,30
B4R25	17,40	21,00
B4R50	18,00	20,50
B4R75	14,30	20,10

Keterangan:  
 NC : Normal Concrete  
 RCA / R : Recycled Coarse Aggregate  
 B : Bacterial Concrete

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat bahwa mutu beton dari penggunaan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar dan bakteri *Bacillus megaterium* berpengaruh terhadap nilai kuat tekan beton. Kuat tekan yang dihasilkan dari variasi beton B2R25 (*Bacillus megaterium* 2%, Limbah beton 25%) merupakan variasi kuat tekan paling optimum dibandingkan dengan NC,

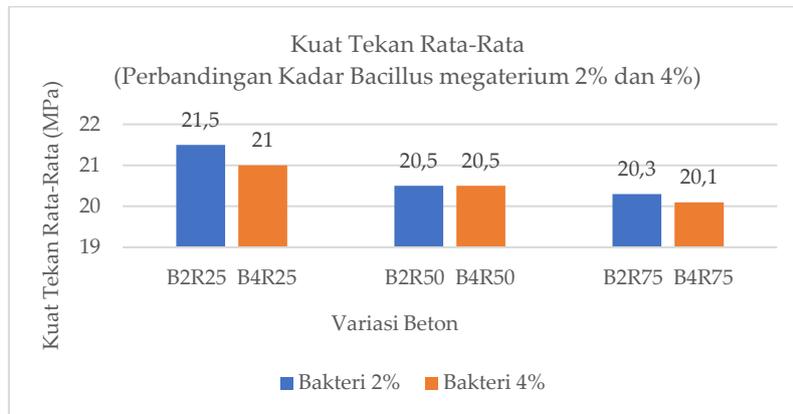
RCA, dan variasi lainnya. Variasi tersebut dapat meningkatkan mutu sebesar 5,39% jika dibandingkan dengan RCA, namun menurunkan mutu sebesar 0,46% jika dibandingkan dengan NC. Selain itu, seluruh variasi sudah melebihi kuat tekan rencana, yaitu sebesar 20 MPa.



**Gambar 4.** Perbandingan kuat tekan rata-rata NC dan RCA

Berdasarkan Gambar 4, penggunaan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar sebesar 100% dapat menurunkan mutu beton sebesar 5,55% jika

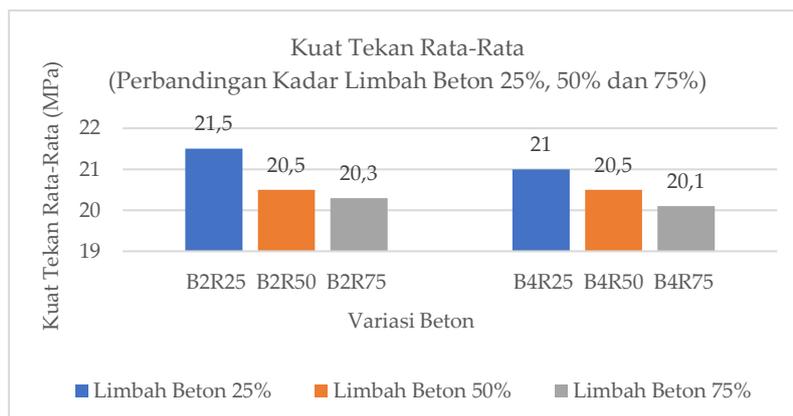
dibandingkan dengan NC. Namun, baik variasi NC maupun RCA keduanya sudah melebihi kuat tekan rencana, yaitu sebesar 20 MPa.



Gambar 5. Perbandingan nilai kuat tekan pada variasi kadar *Bacillus megaterium* 2% dan 4%

Berdasarkan Gambar 5, penggunaan *Bacillus megaterium* sebagai pengganti air sebesar 2% dan 4% dapat mempengaruhi mutu beton. Semakin banyak

*Bacillus megaterium* yang digunakan pada beton berbasis limbah beton 25%, 50% atau 75%, semakin kecil nilai kuat tekan yang dihasilkan.



Gambar 6. Perbandingan nilai kuat tekan pada variasi kadar limbah beton 25%, 50%, dan 75%

Berdasarkan Gambar 6, penggunaan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar sebesar 25%, 50%, dan 75% dapat memengaruhi mutu beton. Semakin banyak limbah beton yang digunakan pada beton berbakteri 2% atau 4%, semakin kecil nilai kuat tekan yang dihasilkan.

## PEMBAHASAN

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase penggunaan limbah beton sebagai substitusi agregat kasar menyebabkan penurunan kekuatan beton, sejalan dengan temuan (Kurniawan dan Putra 2023) yang juga mengalami penurunan kuat tekan pada beton dengan komposisi limbah beton tinggi meskipun tanpa penggunaan bakteri. Dalam penelitian ini mengombinasikan limbah beton dengan bakteri *self-healing concrete* yaitu *Bacillus megaterium* yang dapat

meningkatkan mutu beton seperti mutu beton normal. Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun penggunaan limbah beton dapat menurunkan kekuatan beton, penerapan teknologi *self-healing* berbasis bakteri dapat menjadi pendekatan solutif yang menjanjikan untuk mengatasi penurunan tersebut, sehingga menghasilkan beton daur ulang dengan performa atau kekuatan seperti beton normal.

### Hasil Pengamatan Proses *Self-Healing*

Pengamatan dilakukan setiap seminggu sekali sebanyak empat kali seperti pada Gambar 7. Peran *Bacillus megaterium* sebagai *self-healing agent* sudah berhasil dalam menutupi retakan mikro pada hari ke-7. Hal tersebut terjadi karena aktifnya bakteri *self-healing concrete* yang disebabkan oleh lingkungan lembap serta adanya nutrisi (seperti kalsium laktat) yang disediakan campuran beton sehingga akan memperbaiki struktur

beton dengan pembentukan mineral seperti kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) pada permukaan retakan. Pembentukan mineral tersebut akan mengembalikan

integritas struktural beton dan menghambat jalur air atau udara masuk lebih lanjut.



Gambar 7. Pengamatan *self-healing process* pada sampel beton 28 hari sampai hari ke-28

### Hasil Pemulihan Mutu Beton Pasca-Self-Healing Process

Pengujian kuat tekan beton seperti pada Gambar 8 dilakukan kembali pasca proses *self-healing*

dengan tujuan untuk mengetahui hasil pemulihan mutu pada beton. Adapun hasil dari pengujian tersebut dapat diamati seperti pada Tabel 11.



Gambar 8. Uji kuat tekan pasca-*self-healing*

Tabel 11. Pemulihan mutu beton pasca-*self-healing process*

Kode Sampel	Persentase Pemulihan (%)
B2R25	94,21
B2R50	81,75
B2R75	80,22
B4R25	92,24
B4R50	99,19
B4R75	89,36

*Bacillus megaterium* mampu mengembalikan kekuatan tekan beton terhadap kekuatan awal, yaitu sebesar 80,22 s.d. 99,19 % dalam 28 hari masa pemeliharaan. Angka tersebut melebihi dari penelitian yang dilakukan oleh (Orozco dan Urbino 2022) bahwa penggunaan bakteri dapat mengembalikan kekuatan tekan beton sebesar 50,58% s.d. 65,91%.

### Pemanfaatan Hasil Penelitian

Berdasarkan hasil penelitian, kombinasi antara teknologi *self-healing* dengan pemanfaatan limbah beton sebagai agregat daur ulang telah menunjukkan potensi menghasilkan beton dengan performa mekanis yang

menyerupai beton konvensional dalam hal kekuatan tekan dan ketahanan retak yang dibuktikan dengan penggunaan bakteri *Bacillus megaterium* dapat memulihkan kekuatan tekan beton hingga mendekati nilai kuat tekan awal sebelum proses *self-healing*. Hasil penelitian tersebut tidak hanya relevan pada konstruksi bangunan gedung, tetapi juga memiliki potensi signifikan dalam sektor infrastruktur transportasi, khususnya jalan dan jembatan. Penggunaan beton ini pada jalan raya dan jembatan dapat meningkatkan daya tahan struktur terhadap beban lalu lintas dan perubahan iklim, mengurangi frekuensi serta biaya pemeliharaan, dan mencegah kerusakan lanjutan akibat

retakan mikro yang tidak terdeteksi secara visual. Selain itu, teknologi ini berkontribusi terhadap efisiensi sumber daya dan pengurangan emisi karbon, mengingat minimnya kebutuhan perbaikan atau rekonstruksi dalam jangka panjang.

Penelitian ini dirancang tidak hanya mendukung pengurangan limbah konstruksi, tetapi juga memperkuat upaya pembangunan infrastruktur yang berorientasi pada ekonomi sirkular. Kendati demikian, implementasi beton *self-healing* berbasis limbah masih menghadapi beberapa tantangan, antara lain tingginya biaya awal, variasi kualitas material daur ulang, keterbatasan regulasi teknis, dan perlunya uji lapangan berskala besar untuk menilai efektivitas jangka panjangnya.

Hasil penelitian ini secara lebih luas menunjukkan peluang strategis dalam pengembangan teknologi material berkelanjutan yang dapat diadaptasi pada berbagai jenis proyek infrastruktur, baik skala besar maupun menengah, serta dapat mendorong inovasi kebijakan dalam pengelolaan material konstruksi. Di samping itu, penerapan beton *self-healing* berbasis limbah juga memiliki potensi untuk dikembangkan di wilayah dengan sumber daya material alam terbatas sehingga mendukung kemandirian material lokal dan memperkuat ketahanan sektor konstruksi nasional. Dalam jangka panjang, adopsi teknologi ini dapat menjadi bagian integral dari transformasi menuju infrastruktur cerdas dan ramah lingkungan, yang tidak hanya efisien secara struktural, tetapi juga adaptif terhadap dinamika perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan mobilitas masyarakat. Oleh karena itu, diperlukan sinergi antara pemerintah, akademisi, dan industri dalam mendorong adopsi teknologi ini melalui proyek percontohan pada infrastruktur strategis nasional sebagai upaya mewujudkan konstruksi yang lebih berkelanjutan, adaptif terhadap tantangan lingkungan, dan mendukung pengelolaan sumber daya secara efisien.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan pengujian, didapatkan nilai kuat tekan beton yang menggunakan agregat limbah beton sebagai pengganti seluruh agregat kasar dapat menurunkan mutu sebesar 5,5%. Kemudian, semakin banyak persentase penggunaan limbah beton atau bakteri akan mengurangi mutu beton. Akan tetapi, mutu yang dihasilkan tetap melebihi dari mutu yang direncanakan. Kuat tekan optimum tercapai pada kadar bakteri 2% dan limbah beton 25%. Hal tersebut berarti pembuatan struktur beton dapat menghemat penggunaan agregat alam sebesar 25% dengan bakteri 2% yang dapat mencegah biaya perbaikan dan

perawatan di masa yang akan datang karena beton bakteri akan mengalami *self-healing* sehingga retakan yang terjadi sudah tertutup secara mandiri. Oleh karena itu, beton berbakteri berbasis limbah beton sangat berpotensi untuk diaplikasikan pada konstruksi jalan dan jembatan.

Selain itu, bakteri *Bacillus megaterium* sebagai *self-healing agent* mampu menutupi keretakan mikro pada hari ke-7 untuk sampel beton 28 hari dan mengembalikan kekuatan tekan pada beton sebesar 80,22% s.d. 99,19% setelah 28 hari masa pemeliharaan beton.

### Saran

Adapun saran yang dapat diberikan sebagai rekomendasi penelitian selanjutnya adalah perlu dilaksanakannya pengujian tambahan seperti pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) atau EDS (*Energy Dispersive X-ray*) untuk mengetahui dan mendeteksi kinerja bakteri dalam menghasilkan zat kapur. Kedua, perlu adanya penambahan beberapa persentase bakteri lainnya untuk mengetahui persentase optimum bakteri yang dapat bekerja dalam campuran beton. Selain itu, perlu dilakukan observasi *self-healing process* secara visual dengan umur beton yang lebih lama agar dapat diketahui ketahanan bakteri dalam beton serta lebar retak yang paling optimum setelah proses *self-healing*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung atas fasilitas dan dana yang telah diberikan. Lalu, penulis juga berterima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dalam menyelesaikan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amran, Mugahed, Ali M. Onaizi, Roman Fediuk, Nikolai Ivanovici Vatin, Raizal Saifulnaz Muhammad Rashid, Hakim Abdelgader, and Togay Ozbakkaloglu. "Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review." *Materials* 15, no. 9 (April 29, 2022): 3214. <https://doi.org/10.3390/ma15093214>.
- Fauziah, Lulu, Siti Mutiara Murhayati, Luthfi Muhammad M, dan Linda Aisyah. 2023. "Pengaruh Bakteri *Bacillus Megaterium* sebagai Self-Healing Agent pada Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi." <https://doi.org/10.26760/rekaracana>.
- Herlambang, Wahyu, dan Asih Saraswati. 2017. *Bio Concrete: Self-healing Concrete, Aplikasi*

- Mikroorganisme Sebagai Solusi Pemeliharaan Infrastruktur Rendah Biaya.
- Jakubovskis, Ronaldas, dan Renata Boris. 2022. "The Construction of a Footbridge Prototype with Biological Self-Healing Concrete: A Field Study in a Humid Continental Climate Region." *Materials* 15 (23). <https://doi.org/10.3390/ma15238585>.
- Kurniawan, Septyanto, dan Andika Serdianto Rizki Syah Putra. 2023. "Recycle Concrete Agregate terhadap Kuat Tekan Beton Berbasis Analytical Hierarchy." Vol. 12. <http://u.lipi.go.id/1320332466>.
- Orozco, Christian R., dan Ivan Jan A. Urbino. 2022. "Self-Healing of Cracks in Concrete using Bacillus cibi with Different Encapsulation Techniques." *Journal of Engineering and Technological Sciences* 54 (3). <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.3.5>.
- Paglia, Christian. 2024. "The Durability of Reinforced Concrete Bridges." Dalam <https://doi.org/10.5772/intechopen.112029>.
- Putra, Sony Adiya, dan Nuryasin Abdillah. 2020. "Analisa Kerusakan Jalan Beton (studi Kasus Jalan Arifin Ahmad Kota Dumai)" 13 (1): 74–83.
- Rahmawan, Rama Zaky, Muhammad Fauzan, Heriansyah Putra dan Erizal. 2021. "Aplikasi Bakteri sebagai Agen Self-Healing pada Beton." *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur (SNTI)*. Abad ke-21, Yogyakarta, 25-26 Januari 2021.
- Sara Shomal Zadeh, Navid Joushideh, Behrokh Bahrami, dan Sahel Niyafard. 2023. "A review on concrete recycling." *World Journal of Advanced Research and Reviews* 19 (2): 784–93. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2023.19.2.1631>.
- Savira, Mutia Gina. Keryanti, Keryanti. Mauludin, Luthfi Muhammad. 2022. "Compressive Strength of Bacteria-Based Concrete Bacterials Using Bacillus Megaterium Bacteria." *Batavia Transdisciplinary Symposium*.
- Tayeh, Bassam A., Doha M. Al Saffar, and Rayed Alyousef. "The Utilization of Recycled Aggregate in High Performance Concrete: A Review." *Journal of Materials Research and Technology* 9, no. 4 (June 13, 2020): 8469–81. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.126>.
- Tittelboom, Kim Van, dan Nele De Belie. 2013. "Self-healing in cementitious materials-a review." *Materials* 6 (6): 2182–2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>.
- Tziviloglou, E., V. Wiktor, H. M. Jonkers, dan E. Schlangen. 2016. "Bacteria-based self-healing concrete to increase liquid tightness of cracks." *Construction and Building Materials* 122 (September):118–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.080>.