

# Pengaruh Bakteri *Bacillus megaterium* sebagai Self-Healing Agent terhadap Kuat Lentur dan Kuat Tarik Tidak Langsung Beton Geopolimer

## Article History:

Received

20 Desember 2026

Revised

20 Januari 2026

Accepted

12 Maret 2026

STELLA NATHANIA<sup>1</sup>, LUTHFI M. MAULUDIN<sup>1\*</sup>,  
GANDHI WIDIARNOKO<sup>2</sup>, MUHAMMAD AZHAR A. D.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>PT. Vexcolt Indonesia Pratama, Bogor, Indonesia

<sup>3</sup>PT. Hissan Trading Indonesia, Jakarta, Indonesia

\*Corresponding email: [luthfi-mm@polban.ac.id](mailto:luthfi-mm@polban.ac.id)

## ABSTRAK

Beton geopolimer disusun dari material daur ulang yang ramah lingkungan, yaitu fly ash, recycled concrete aggregate, serta limbah serbuk cangkang telur dan kerang, sebagai upaya pengurangan penggunaan semen portland. Metode penelitian dilakukan melalui pengembangbiakan bakteri, pengolahan agregat limbah, pengujian sifat fisis material, serta pembuatan benda uji silinder dan balok. Hasil pengujian menunjukkan beton normal memiliki kuat tarik tidak langsung dan kuat lentur lebih tinggi dibandingkan dengan beton geopolimer. Penambahan bakteri mampu meningkatkan kekuatan beton geopolimer secara signifikan. Nilai kuat lentur beton geopolimer berbasis self-healing meningkat sekitar 29% dibandingkan dengan geopolimer biasa dan mendekati performa beton normal. Namun, beton geopolimer tidak mengalami self-healing disebabkan oleh larutan aktivator alkali 10 M dengan pH > 14. Meskipun kekuatan tekan mungkin melebihi beton geopolimer biasa, lingkungan alkali yang kuat bukanlah pH yang sesuai untuk bakteri *Bacillus megaterium*.

**Kata kunci:** *Bacillus megaterium*, beton geopolimer, kuat lentur, kuat tarik tidak langsung, self-healing

## ABSTRACT

Geopolymer concrete is composed of environmentally friendly recycled materials, namely fly ash, recycled concrete aggregate, as well as waste powder from eggshells and seashells, as an effort to reduce the use of Portland cement. The research method was carried out through bacterial cultivation, waste aggregate processing, testing of the physical properties of materials, and the fabrication of cylindrical and beam specimens. The test results showed that normal concrete had higher splitting tensile strength and flexural strength compared to geopolymer concrete. The addition of bacteria was able to significantly improve the strength of geopolymer concrete. The flexural strength of self-healing-based geopolymer concrete increased by about 29% compared to ordinary geopolymer and approached the performance of normal concrete. However, geopolymer concrete did not undergo self-healing due to the use of a 10M alkaline activator solution with a pH > 14. Although the compressive strength may exceed that of ordinary geopolymer concrete, the strong alkaline environment is not a suitable pH for *Bacillus Megaterium* bacteria.

**Keywords:** *Bacillus megaterium*, geopolymer concrete, flexural strength, indirect tensile strength, self-healing

This is an open-access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



## PENDAHULUAN

Beton geopolimer diartikan sebagai beton ramah lingkungan yang menggantikan 100% semen konvensional dengan bahan ramah lingkungan yang memiliki karakteristik dan kandungan yang serupa. Beton geopolimer terbentuk dari bahan dasar yang memiliki kandungan silikon dan aluminium yang tinggi dan memakai bahan anorganik sebagai pengikat seperti alumina-silikat dari material geologi alam yang banyak ditemukan pada *fly ash* yang dibutuhkan untuk menggantikan semen [12].

Namun, penggunaan limbah daur ulang sebagai agregat dalam beton geopolimer masih memerlukan kajian mendalam, terutama terhadap sifat mekanik beton yang dihasilkan. Dua parameter penting dalam menilai performa mekanik beton adalah kuat lentur dan kuat tarik tidak langsung (*indirect tensile strength*), yang mencerminkan ketahanan beton terhadap gaya tarik dan retak. Dalam konteks beton *self-healing*, kemampuan beton untuk memperbaiki kerusakan mikro secara mandiri sangat berkaitan erat dengan kualitas mikrostruktur dan daya tahan mekaniknya. Beton setelah mengalami pengerasan akan mampu menahan gaya tekan yang tinggi, tetapi tidak mampu menahan gaya tarik [15].

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 yang merupakan endapan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Adapun konsep dari proses *self-healing*, yaitu pada **Persamaan 1** berikut:



Dalam konteks beton *self-healing*, kuat tarik tidak langsung dan kuat lentur menjadi dua parameter mekanik yang sangat penting untuk dikaji. Kedua parameter ini berperan dalam menunjukkan sejauh mana beton mampu menahan gaya tarik serta lentur sebelum dan sesudah mekanisme penyembuhan diri berlangsung. Beton yang mampu memulihkan kekuatannya setelah terjadi retak menunjukkan efektivitas sistem *self-healing* yang diterapkan.

Penelitian terhadap pengaruh bahan, metode pencampuran, serta sistem *self-healing* terhadap kuat tarik dan lentur beton sangat diperlukan untuk mendukung pengembangan material konstruksi yang lebih tahan lama dan berkelanjutan. Dengan demikian, evaluasi terhadap kuat tarik dan kuat lentur pada beton berbasis *self-healing* bukan hanya menjadi aspek teknis, tetapi juga mendukung tujuan global dalam mengurangi biaya perawatan infrastruktur dan dampak lingkungan dari pembangunan.

Karena ditinjau dari segi mekaniknya, beton mempunyai kuat tarik yang relatif lebih rendah daripada kuat tekannya. Presentase kekuatan tarik beton sekitar 10% hingga 15% terhadap kekuatan tekannya. Untuk menanggulangi kelemahan pada beton ini, digunakan tulangan baja. Walaupun kuat tarik beton tidak digunakan dalam perencanaan beton bertulang, namun kuat tarik beton berperan dalam meminimalisir retak retak pada beton sehingga tidak terjadi korosi pada tulangan baja yang disebabkan oleh air yang masuk [11]. Sehingga beton geopolimer bertulang berfungsi untuk menaikkan kuat tarik dan kuat lentur. Hal ini mengakibatkan beton memiliki ketahanan yang tinggi terhadap cuaca serta temperatur pada kekuatan tarik dan lentur [13]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui mutu kuat lentur dan mutu kuat tarik tidak langsung dari spesimen balok dan silinder beton normal, beton geopolimer, serta beton geopolimer berbasis bakteri *Bacillus megaterium*, serta mengetahui pengaruh bakteri *Bacillus megaterium* sebagai *self-healing* pada retakan benda uji balok pascakuat lentur.

## METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, yaitu dengan mengumpulkan data primer pada pengujian berskala laboratorium dengan 3 tahapan. Tahap awal atau tahap persiapan penelitian ini adalah melakukan pengembangbiakan bakteri *Bacillus megaterium* di Laboratorium Bioproses, pencacahan limbah benda uji silinder berukuran  $15 \times 30$  cm di Laboratorium Batu dan Beton, serta pengujian bahan penyusun beton normal maupun beton geopolimer dan pembuatan benda uji di Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Negeri Bandung.

## Pengaruh Bakteri *Bacillus megaterium* Sebagai *Self-Healing Agent* Terhadap Kuat Lentur dan Kuat Tarik Tidak Langsung Beton Geopolimer

### Proses Pengembangbiakan Bakteri

Tahap pertama penelitian ini yaitu melakukan pengembangbiakan bakteri *Bacillus megaterium* di Laboratorium Bioproses.

1. Proses pengembangbiakan bakteri *Bacillus megaterium* yang dilaksanakan di laboratorium bioproses (**Tabel 1**) dimulai dengan pembuatan media padat menggunakan *Nutrient Agar* (NA). Langkah pertama adalah menimbang nutrient agar sesuai dengan petunjuk takaran yang tercantum pada kemasan, yaitu 28 g NA untuk 1 liter air.
2. Setelah itu, ditambahkan 5 g agar bakteriologis ke dalam campuran tersebut. Larutan NA kemudian dipanaskan di atas *hotplate* hingga suhu mencapai 180 °C. Setelah larutan tercampur sempurna dan mencapai suhu yang diinginkan, media agar tersebut dikemas ke dalam tabung reaksi untuk selanjutnya digunakan dalam proses penanaman bakteri.
3. Selanjutnya dilakukan pembuatan media cair dengan menggunakan *Nutrient Broth* (NB). Proses ini diawali dengan menimbang *nutrient broth* instan sebanyak 6,5 g dalam 500 ml air atau untuk satu tabung Erlenmeyer, lalu larutan dipanaskan menggunakan *hotplate* dan alat bantu *spinner* untuk memastikan pencampuran yang merata. Setelah selesai, media cair dikemas ke dalam tabung Erlenmeyer.
4. Sebelum digunakan untuk menumbuhkan bakteri, media padat maupun media cair harus melalui proses sterilisasi. Sterilisasi ini bertujuan untuk membunuh mikroorganisme lain yang berpotensi mengontaminasi bakteri. Proses sterilisasi dilakukan menggunakan alat *autoclave* pada suhu 121 °C selama 15 menit dengan tekanan 1 atm.
5. Setelah proses sterilisasi selesai, barulah dilakukan penanaman bakteri *Bacillus megaterium* ke dalam media cair dan padat yang telah disiapkan.

**Tabel 1. Proses Pengembangbiakan Bakteri**



### Proses Pencacahan Limbah Benda Uji Beton

Proses pengolahan limbah benda uji beton dimulai dengan pemilihan limbah benda uji berbentuk silinder 15 × 30 cm yang masih layak untuk didaur ulang.

1. Limbah benda uji beton yang dipilih yaitu yang masih memiliki karakteristik fisik yang memungkinkan untuk diproses ulang menjadi agregat daur ulang.
2. Setelah limbah beton dipilih, dilakukan persiapan alat *stone crusher*. Alat ini digunakan untuk menghancurkan beton limbah menjadi ukuran yang lebih kecil dan dapat digunakan kembali sebagai agregat. *Stone crusher* disiapkan dan dicek agar berfungsi dengan optimal dalam proses pencacahan.
3. Langkah berikutnya adalah pencacahan limbah benda uji (**Tabel 2**). Beton limbah dimasukkan ke dalam mesin *stone crusher* untuk dihancurkan menjadi bagian-bagian kecil. Proses ini dilakukan dengan hati-hati agar menghasilkan agregat dengan ukuran yang sesuai standar dan tidak terlalu banyak menghasilkan partikel halus.
4. Setelah melalui proses pencacahan, dihasilkan RCA (*Recycle Concrete Aggregate*) yang telah diolah dan siap digunakan sebagai substitusi agregat dalam campuran beton baru. Agregat hasil daur ulang ini dapat dimanfaatkan kembali untuk berbagai aplikasi konstruksi, terutama dalam penelitian atau produksi beton ramah lingkungan.

**Tabel 2. Proses Pencacahan Limbah Benda Uji Menjadi RCA**

Proses Pengolahan RCA (Recycle Concrete Aggregate)			
			
Pemisahan limbah benda uji	Persiapan alat stone crusher	Pencacahan limbah benda uji	RCA (Recycle Concrete Aggregate) yang sudah diolah

**Proses Pengujian Sifat Fisis Material Penyusun Beton Normal dan Beton Geopolimer**

Pengujian material dilakukan untuk menentukan kualitas material yang akan digunakan dalam proses manufaktur. Pengujian yang dilakukan meliputi analisis saringan, berat jenis, kadar air, dan penyerapan pada agregat halus untuk beton normal dan beton geopolimer, dengan menggunakan standar SNI 1971:2011 [3], SNI 1969:2016 [6], dan ASTM C 136-2012 [4]. Pengujian yang lain, seperti uji berat jenis curah dan penyerapan pada agregat kasar dan RCA, dilakukan sesuai dengan SNI 1969:2016 [6]. Pengujian berat jenis curah agregat dilakukan berdasarkan SNI 03-4804:1998 [9]. Pengujian kadar lumpur halus mengacu pada SNI 2461:2014 [5] dan ASTM C33:2003 [2]. Pengujian kandungan bahan organik dilakukan sesuai SNI 2816:1992 [8]. Pengujian berat jenis semen, fly ash, cangkang telur, dan cangkang kerang mengacu pada SNI

2531:2015 [7]. Selain itu, pengujian analisis saringan dan reaktivitas fly ash didasarkan pada ASTM C-618 [1] dan SNI 2460:2014 [10].

Material yang digunakan pada beton normal terdiri dari semen portland, batu pecah lolos saringan 19 mm, pasir alam, dan air. Sedangkan beton geopolimer terdiri dari fly ash, RCA lolos saringan 19 mm, serbuk cangkang telur, dan serbuk cangkang kerang. Pengujian karakteristik material pembentuk beton perlu dilakukan untuk mengetahui dan menganalisis sifat-sifat material agar syarat sebagai material campuran beton dapat terpenuhi.

**Pembuatan Mix Design Beton Normal dan Beton Geopolimer**

Setelah pengujian sifat fisis pada material yang dilakukan di laboratorium uji bahan, selanjutnya dilakukan perhitungan dan pembuatan mix design beton normal maupun beton geopolimer sesuai dengan rancangan mix design.

**Tabel 3. Pengujian Sifat Fisis Material Penyusun Beton Normal dan Geopolimer**

Proses Pengujian Semen, Pasir, dan Batu pecah			
			
Analisa ayak pasir	Pengujian berat jenis pasir	Pengujian bobot isi batu pecah	Pengujian kadar penyerapan batu pecah
Proses Pengujian Fly Ash, Serbuk Cangkang Kerang, Serbuk Cangkang Telur, dan RCA			
			
Pengujian kadar organik serbuk cangkang telur	Pengujian berat jenis serbuk cangkang kerang	Pengujian abrasi dan keausan RCA	Pengujian keaktifan fly ash

## Pengaruh Bakteri *Bacillus megaterium* Sebagai *Self-Healing Agent* Terhadap Kuat Lentur dan Kuat Tarik Tidak Langsung Beton Geopolimer

### Proses Pembuatan Benda Uji Beton Normal

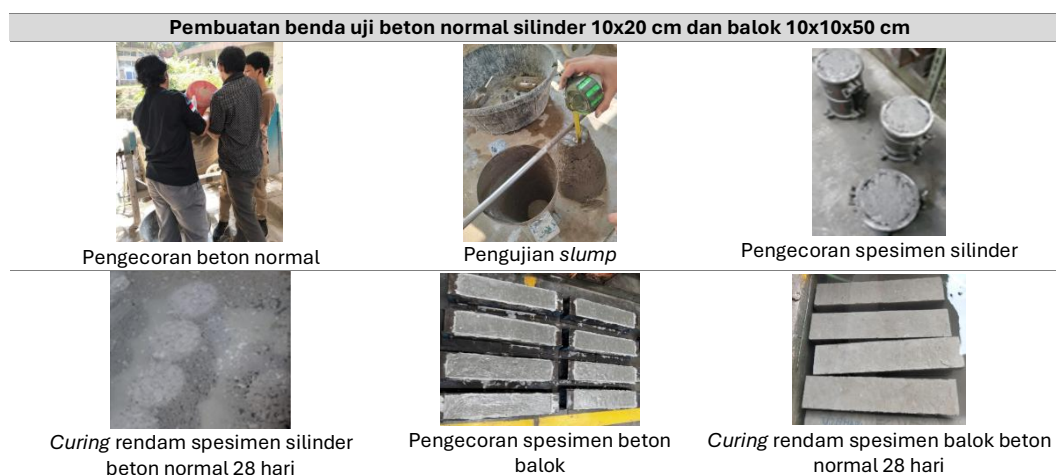
Pembuatan beton normal berdasarkan rancangan campuran dari SNI 7656:2012 dengan mutu rencana 30 MPa.

1. Tahapan proses pembuatan dan pengujian beton normal mulai dari pengecoran hingga perawatan spesimen. Proses diawali dengan kegiatan pengecoran beton normal, di mana material beton dicampur dan dituangkan untuk pembuatan berbagai jenis spesimen uji. Setelah itu, dilakukan pengujian *slump* untuk mengukur tingkat kelecakan (*workability*) adukan beton sebelum dicetak.
2. Berikutnya, adukan beton dituangkan ke dalam cetakan berbentuk silinder pada

tahap pengecoran spesimen beton silinder. Spesimen silinder tersebut kemudian dirawat melalui *curing* rendam selama 28 hari untuk menjaga kelembapan dan memastikan proses hidrasi berlangsung optimal.

3. Selain silinder, dibuat pula spesimen beton berbentuk balok, yang setelah dicetak juga direndam dalam air selama 28 hari pada tahap *curing* rendam spesimen balok beton normal. Perawatan ini bertujuan untuk mendapatkan sifat mekanis beton yang maksimal sebelum dilakukan pengujian kekuatan.

Tabel 4. Proses Pembuatan Beton Normal



### Proses Pembuatan Benda Uji Beton Geopolimer

Pembuatan beton geopolimer biasa maupun yang berbasis *self-healing* berdasarkan rancangan campuran dari *trial mix* yang mengacu pada penelitian terdahulu dengan mutu rencana 30 MPa.

1. Proses pembuatan beton geopolimer pada gambar tersebut diawali dengan tahap pembuatan larutan alkali aktivator. Berdasarkan rencana desain, larutan dibuat dari campuran natrium hidroksida (NaOH) 10 molar dan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Perhitungan kebutuhan NaOH dilakukan berdasarkan volume larutan yang dibutuhkan, kemudian kristal NaOH ditimbang sesuai hasil perhitungan. Kristal ini dilarutkan ke dalam air bersih hingga volume yang ditentukan, diaduk sampai

larut sempurna, dan didiamkan minimal 24 jam sebelum digunakan untuk memastikan reaksi awal selesai.

2. Tahap berikutnya adalah pembuatan bahan perekat, yang terdiri dari pencampuran *fly ash* dan larutan alkali aktivator.
3. Selanjutnya dilakukan pencampuran agregat. Agregat kasar dikeringkan pada suhu 105 °C selama satu jam untuk mengurangi kadar air, lalu dicampurkan dengan agregat halus dan perekat geopolimer secara bertahap hingga merata.
4. Proses pembuatan beton geopolimer dengan cara mencampur agregat dan bahan perekat dituangkan ke dalam *mixer* hingga homogen.
5. Setelah adukan siap, dilakukan pencetakan beton geopolimer ke dalam

cetakan. Spesimen yang telah dicetak kemudian mengalami proses *curing* panas dengan oven pada suhu 60–90 °C selama 24 jam untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Setelah itu, beton dikeluarkan dari cetakan dan didiamkan

pada suhu ruang sebelum dilakukan pengujian.

**Tabel 5. Proses Pembuatan Beton Geopolimer**



**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil *Mix Design* Beton Normal dan Beton Geopolimer**

Berdasarkan pengujian sifat fisis dan hasil perhitungan dan pembuatan *mix design*, diperoleh proporsi campuran beton dengan kuat tekan rencana 30 MPa yang disesuaikan dengan kebutuhan jumlah benda uji pada **Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8.**

**Tabel 6. *Mix Design* Beton Konvensional Per 1 Benda Uji**

Benda Uji	Komposisi [kg]			
	Semen	Ag. Kasar	Ag. Halus	Air
Silinder 10x20 cm	0,619	1,705	1,061	0,290
Balok 10x10x50 cm	1,970	5,430	3,380	0,925

**Tabel 7. *Mix Design* Beton Geopolimer Per 1 Benda Uji**

Benda Uji	Komposisi [kg]							
	Fly Ash	Ag. Halus (CT)	Ag. Halus (CK)	Ag. Kasar (RCA)	Air	NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Molaritas (M)
Silinder 10x20 cm	0,75	0,49	0,64	1,51	0,38	0,188	0,470	10
Balok 10x10x50 cm	2,40	1,56	2,04	4,80	1,20	0,297	0,743	

**Tabel 8. *Mix Design* Balok Beton Geopolimer Berbasis *Self-Healing* Per 1 Benda Uji**

Benda Uji	Komposisi	[kg]
Balok 10x10x50 cm	Fly Ash	2,40
	Ag. Halus (CT)	1,56
	Ag. Halus (CK)	2,04
	Ag. Kasar (RCA)	4,80
	Air	1,20
	NaOH (10 M)	0,297
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,743
	Bakteri <i>Bacillus megaterium</i>	0,024
Kalsium Laktat	0,048	

**Hasil Pengujian Kuat Lentur dan Kuat Tarik Tidak Langsung**

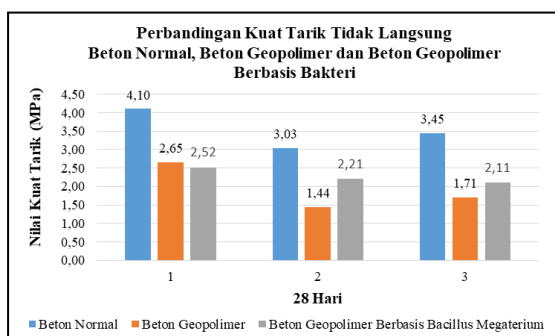
Pengujian kuat tarik tidak langsung untuk beton silinder berukuran 10 × 20 cm mengacu pada SNI 2491:2014 yang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 9 dan Gambar 1, sedangkan pengujian kuat lentur mengacu pada SNI 4421:2011 yang hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 10** dan **Gambar 2.**

Pengaruh Bakteri *Bacillus megaterium* Sebagai *Self-Healing Agent* Terhadap Kuat Lentur dan Kuat Tarik Tidak Langsung Beton Geopolimer

**Tabel 9. Hasil Pengujian Kuat Tarik Tidak Langsung Beton Silinder**

Kode	Umur [hari]	Dimensi [mm]		Luas [mm <sup>2</sup> ]	Berat [kg]	Kuat Tarik Tidak Langsung [MPa]
		D	T			
SK1	28	102	201	8.167,1	3,311	4,10
SK2		103	200	8.328,1	3,149	3,03
SK3		101	201	8.007,8	3,208	3,45
SG1		905	199	6.429,35	2,73	2,65
SG2		101	202	8.007,79	3,09	1,44
SG3		100,5	203,5	7.928,70	2,94	1,71
SG-BM1		100,2	201,7	7.881,43	3,00	2,52
SG-BM2		101	200	8.007,79	2,84	2,21
SG-BM2		100	202,4	7.850,00	3,11	2,11

Hasil pengujian kuat tarik tidak langsung beton pada umur 28 hari menunjukkan bahwa beton normal memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan beton geopolimer. Pada kelompok beton kontrol (SK); nilai kuat tarik tidak langsung tertinggi diperoleh oleh spesimen SK1 sebesar 4,10 MPa; sedangkan nilai terendah tercatat pada SK2 sebesar 3,03 MPa. Beton geopolimer (SG) menunjukkan kisaran kuat tarik tidak langsung antara 1,44 MPa hingga 2,65 MPa. Nilai tertinggi dicapai oleh SG1 sebesar 2,65 MPa; sedangkan nilai terendah terdapat pada SG2 sebesar 1,44 MPa. Sedangkan beton geopolimer yang diberi tambahan bakteri (SG-BM) mengalami peningkatan nilai kuat tarik tidak langsung dibandingkan dengan beton geopolimer tanpa bakteri. Kisaran nilainya berada pada 2,11 MPa hingga 2,52 MPa; yang menunjukkan adanya efek positif dari penambahan bakteri meskipun nilainya masih belum mampu melampaui beton normal.



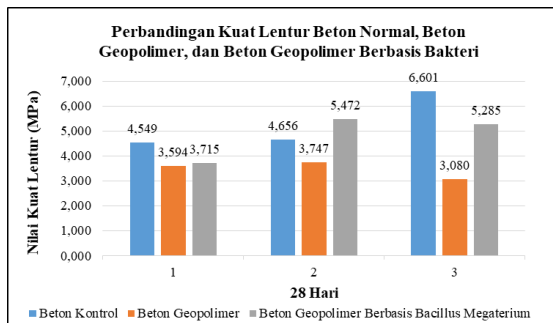
**Gambar 1. Perbandingan kuat tarik tidak langsung beton normal dan geopolimer**

**Tabel 10. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton Balok**

Kode	Umur [hari]	Dimensi [mm]			Luas [mm <sup>2</sup> ]	Berat [kg]
		b	h	L		
BK1	28	100	101	500	12,10	4,549
BK2		110	110	495	12,08	4,656
BK3		101	105	500	11,88	6,601
BG1		100	95	490	9,6	3,594
BG2		100	90	500	8	3,747
BG3		100	95	500	8,67	3,080
BG+BM1		100	100	500	9,45	3,715
BG+BM2		100	100	510	10	5,472
BG+BM3		100	95	500	8,83	5,285

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur pada umur 28 hari, diketahui bahwa balok kontrol (BK) menunjukkan nilai kuat lentur yang paling tinggi secara umum. Sampel BK3 mencapai nilai tertinggi sebesar 6,601 MPa; sementara rata-rata kuat lentur dari ketiga sampel BK berada di kisaran 5,27 MPa. Beton geopolimer (BG) menunjukkan performa yang lebih rendah dengan nilai kuat lentur berkisar antara 3,080 MPa hingga 3,747 MPa. Rata-rata kuat lentur beton geopolimer adalah sekitar 3,47 MPa; yang berarti mengalami penurunan sekitar 34% dibandingkan dengan beton normal. Sementara itu, beton *self-healing* geopolimer (BG+BM) menunjukkan peningkatan dibandingkan dengan beton geopolimer biasa. Nilai kuat lentur tertinggi beton geopolimer berbasis *self-healing* sebesar 5,285 MPa; dengan rata-rata kuat lentur beton geopolimer berbasis *self-healing* sebesar 4,49 MPa, yang berarti meningkat sekitar 29% dibanding beton geopolimer biasa dan mendekati performa

beton normal. Secara keseluruhan, penambahan bakteri dalam beton geopolimer mampu meningkatkan kekuatannya secara signifikan, meskipun belum sepenuhnya melampaui performa beton konvensional.



**Gambar 2. Perbandingan kuat lentur beton normal dan geopolimer**

### Hasil Analisis Pengamatan *Self-Healing* Akibat Kuat Lentur

Setelah proses perawatan dan pengamatan selama 28 hari, beton geopolimer yang berbasis *self-healing* tidak menunjukkan tanda-tanda penutupan retak. Sehingga perlu ditindaklanjuti penyebab ketidakterjadinya *self-healing*.

**Tabel 11. Kondisi Benda Uji Beton Geopolimer Berbasis *Self-Healing* Pasca Pengujian**



### KESIMPULAN

Beton geopolimer memiliki keterbatasan dalam menahan gaya tarik yang bisa disebabkan oleh perbedaan karakteristik mikrostruktur, ikatan antarpartikel, dan jenis material penyusun beton geopolimer yang berupa limbah dibandingkan dengan material penyusun beton normal. Meskipun beton geopolimer memiliki kekuatan tarik tidak langsung lebih rendah dari beton normal, inovasi penambahan bakteri dapat meningkatkan kinerjanya dan berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut.

Dikarenakan menggunakan agregat limbah berupa serbuk cangkang telur, cangkang kerang, dan limbah benda uji beton, penurunan kuat lentur pada beton geopolimer kemungkinan dipengaruhi oleh sifat fisik dan mekanis agregat limbah yang berbeda dari agregat alami. Agregat limbah umumnya memiliki porositas lebih tinggi, bentuk partikel yang kurang ideal, serta daya ikat yang lebih rendah terhadap pasta pengikat, sehingga berpengaruh pada penurunan kekuatan. Namun, penambahan bakteri *Bacillus megaterium* membantu memperbaiki ikatan mikrostruktur melalui proses pengendapan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), yang mengisi pori-pori dan retakan mikro, sehingga mampu meningkatkan kuat lentur beton geopolimer berbasis agregat limbah secara signifikan dibandingkan dengan yang tanpa bakteri.

Meskipun penambahan bakteri pada beton geopolimer dapat meningkatkan kuat tarik tidak langsung, performanya masih berada di bawah beton normal. Hal ini menunjukkan bahwa beton normal masih unggul dari segi kekuatan tarik tidak langsung, namun beton geopolimer berbasis bakteri memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut guna mendekati atau bahkan melampaui performa beton konvensional. Maka dapat disimpulkan secara keseluruhan bahwa penambahan bakteri *Bacillus megaterium* dalam beton geopolimer mampu meningkatkan kekuatan tarik dan lentur secara signifikan, meskipun belum sepenuhnya melampaui performa beton konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis bakteri *Bacillus megaterium* memiliki potensi yang baik untuk dikembangkan lebih lanjut, terutama pada struktur yang memerlukan ketahanan terhadap beban lentur.

### SARAN

Beton geopolimer yang tidak mengalami *self-healing* disebabkan oleh larutan aktivator alkali 10 M dengan  $\text{pH} > 14$ . Meskipun kekuatan tarik dan lentur mungkin melebihi beton geopolimer biasa, lingkungan alkali yang kuat bukanlah  $\text{pH}$  yang sesuai untuk bakteri *Bacillus megaterium*. Oleh karena itu, sebagai rekomendasi untuk perbaikan di masa depan, konsentrasi larutan dan metode pencampuran bakteri perlu dievaluasi ulang.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung atas dukungan fasilitas dan pendanaan yang diberikan selama proses penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang turut membantu dan berperan dalam menyelesaikan penelitian ini.

## DAFTAR RUJUKAN

- [1] ASTM International. (n.d.-a). *ASTM C618 Pozzolan*.
- [2] ASTM International. (n.d.-b). *ASTM C33-03 Standard Specification for Concrete Aggregates*.
- [3] Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Standar Nasional Indonesia (SNI 1971:2011) Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Standar Nasional Indonesia (SNI ASTM C136:2012) Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar (ASTM C 136-06, IDT)*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- [5] Badan Standardisasi Nasional. (2014). *Standar Nasional Indonesia (SNI 2461:2014) Spesifikasi agregat ringan untuk beton struktural Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete (ASTM C330/C330M-09, IDT)*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- [6] Badan Standardisasi Nasional. (2016). *Standar Nasional Indonesia (SNI 1969:2016) Metode uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*.
- [7] Badan Standardisasi Indonesia. (2017). *Standar Nasional Indonesia (SNI 2531:2015) Pengujian bahan semen*.
- [8] Badan Standardisasi Nasional. (1992). *Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2816:1992) Metode pengujian kotoran organik dalam pasir untuk campuran mortar atau beton*.
- [9] Badan Standardisasi Nasional. (1998). *Standar Nasional Indonesia (SNI 03-4804-1998) Metode Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*.
- [10] Badan Standardisasi Nasional. (2008). *Standar Nasional Indonesia SNI 2460:2014) Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakandalam beton*. [www.bsn.go.id](http://www.bsn.go.id)
- [11] Budi, A. S., Purwanto, & Aji, A. W. C. (2021). Kajian Kuat Tarik Langsung Dan Kuat Tarik Belah Beton Dengan Fly Ash Kadar 15%, 30%, Dan 40% Sebagai Pengganti Semen Terhadap Beton Normal. *Matriks Teknik Sipil*, 9(3), 200–207. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v9i3.54546>
- [12] Budi, A. S., & Tampubolon, J. F. (2024). *Pengaruh Kadar Aktivator dan Rasio SS/SH pada Beton Geopolimer terhadap Kuat Tekan*.
- [13] Siregar, U. M., Megasari, S. W., & Aggraini, M. (2023). Karakteristik Kuat Tekan Dan Lentur Beton Geopolimer Serat Bubut Besi. *SENKIM: Seminar Nasional Karya Ilmiah Multidisiplin*, 3 (1), 94–101.
- [14] Tziviloglou, E., Wiktor, V., Jonkers, H. M., & Schlangen, E. (2016). Bacteria-based self-healing concrete to increase the liquid tightness of cracks. *Construction and Building Materials*, 122, 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.080>
- [15] Wibowo, Sunarmasto, & Rashad, H. (2019). *Kajian Kuat Tarik Langsung Dan Kuat Lekat Pada Beton Mututinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Kadar Metakaolin*. e-Jurnal Matriks Teknik Sipil.