

## OPTIMASI KEKUATAN TARIK BELAH BETON MUTU TINGGI MELALUI PENINGKATAN EFEKTIVITAS BAKTERI PADA *SELF-HEALING CONCRETE*

### *The Improvement of the Tensile Strength of High-Strength Concrete through the Optimization of Bacteria in Self-Healing Concrete*

Andi Alepu<sup>1\*</sup>, Teuku Budi Aulia<sup>2</sup>, Yunita Idris<sup>3</sup>

<sup>123</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
Jalan Tgk. Syech Abdur Rauf No. 7 Darussalam Banda Aceh 23111  
Surel: <sup>1</sup>andialepu9@gmail.com\*, <sup>2</sup>aulia@usk.ac.id, <sup>3</sup>yunita.idris@usk.ac.id.

Diterima : 6 Agustus 2024;

Disetujui : 21 Oktober 2024

#### **Abstrak**

Beton mutu tinggi memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton biasa, menjadikannya pilihan ideal untuk struktur bangunan yang menopang beban besar seperti gedung tinggi, jembatan, dan menara. Namun, kelemahan beton terletak pada sifatnya yang rentan terhadap tarik, dapat menyebabkan retakan mikro yang berpotensi berkembang menjadi retakan makro tanpa terdeteksi. Untuk mengatasi masalah ini, muncul inovasi berupa *Self-Healing Concrete (SHC)*, di mana bakteri seperti *solibacillus*, *bacillus*, dan *staphylococcus* ditambahkan ke dalam campuran beton. Bakteri ini menghasilkan senyawa yang membentuk endapan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), secara mandiri menutupi retakan mikro melalui metabolismenya. Penelitian ini bertujuan meningkatkan umur beton dan keamanan struktur dengan menambahkan bakteri pada campuran beton. Pengujian menggunakan silinder berukuran diameter 15 cm x tinggi 30 cm dengan retakan awal diberikan setelah 7 hari perendaman dan kekuatan tekan mencapai 30 MPa, sehingga 80% dari kuat tekan beton rencana  $f_c$  50 MPa. Pengujian akan dilakukan pada hari ke 28. Hasil pengujian kuat tarik belah yang menggunakan bakteri *solibacillus* dengan rata-rata 4,46 MPa, bakteri *bacillus* dengan rata-rata 4,51 MPa, dan bakteri *staphylococcus* dengan rata-rata 5,48 MPa. Hasil pengujian SEM menggambarkan substansi batang yang terkait dengan kristal kalsit pada setiap sampel beton bakteri. Penggunaan bakteri sebagai agen *self-healing* memberikan dampak positif dengan peningkatan kuat tarik belah, pengurangan penyerapan air, dan penurunan permeabilitas beton.

**Kata Kunci:** Beton mutu tinggi, *solibacillus sp.*, *bacillus sp.*, *staphylococcus sp.*, kuat tarik belah, *self-healing concrete*

#### **Abstract**

High-strength concrete has a higher compressive strength compared to regular concrete, making it an ideal choice for structures that bear heavy loads, such as tall buildings, bridges, and towers. However, the weakness of concrete lies in its susceptibility to tensile forces, leading to the development of microcracks that may potentially evolve into macrocracks without detection. To address this issue, an innovation known as *Self-healing Concrete (SHC)* has emerged, wherein bacteria such as *solibacillus*, *bacillus*, and *staphylococcus* are added to the concrete mix. These bacteria produce compounds that form calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) deposits, autonomously closing microcracks through their metabolism. This research aims to enhance the lifespan of concrete and the safety of structures by incorporating bacteria into the concrete mix. Testing was conducted using cylinders with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm, with initial cracks introduced after 7 days of immersion and compressive strength reaching 30 MPa, which is 80% of the planned compressive strength of 50 MPa. Testing was performed on day 28. The results of the split tensile strength tests using *solibacillus* bacteria showed an average of 4.46 MPa, *bacillus* bacteria with an average of 4.51 MPa, and *staphylococcus* bacteria with an average of 5.48 MPa. Scanning Electron Microscopy (SEM) results depicted substances related to calcite crystals in each bacterial concrete sample. The use of bacteria as a *self-healing* agent has a positive impact, including increased split tensile strength, reduced water absorption, and decreased concrete permeability.

**Keywords:** High-strength concrete, *solibacillus sp.*, *bacillus sp.*, *staphylococcus sp.*, split tensile strength, *self-healing concrete*.

## PENDAHULUAN

Beton sebagai salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan, lemah pada kekuatan tarik, retak dan ketidakstabilan terhadap retak. Sebab terjadinya sifat retak beton seperti daya tahan, permeabilitas dan kekuatan struktur beton berkurang. Bila retakan mikro tumbuh dan mencapai tulangan, tidak hanya beton itu sendiri yang dapat diserang, tetapi juga tulangan akan terkorosi ketika terkena air serta oksigen, dan kemungkinan karbon dioksida serta klorida. Oleh sebab itu, retakan mikro ialah prekursor kegagalan struktur (De Belie, dkk, 2008).

Retakan yang timbul bila tidak ditangani, dapat sebagai jalan masuknya partikel-partikel yang mengakibatkan kerusakan di beton seiring berjalannya waktu. Sifat kurang baik dari retakan pada beton dapat diperbaiki dengan cara menambahkan bakteri beton *self-healing* yang terbentuk dengan bantuan bakteri yang diinduksi, oleh karena itu beton *self-healing* pula memiliki kemampuan untuk memperbaiki retak-retak kecil yang terbentuk dalam struktur beton seiring waktu. Retak-retak ini bisa muncul akibat pembebanan, perubahan suhu, atau faktor-faktor lainnya. Teknologi ini bertujuan untuk memperpanjang umur beton dan meningkatkan keamanan struktur (Tziviloglou, dkk, 2016).

Perbaikan retak pada beton, dalam memanfaatkan bakteri sudah dikembangkan pada penelitian (Huynh, dkk, 2017), penelitian ini memakai tanah diatomit buat larutan bakteri. Metode penyembuhan dengan bakteri ini lebih disukai daripada teknologi lain sebab ramah lingkungan, berbasis bio, tahan lama, serta hemat pengeluaran.

Bahan bakteri yang akan digunakan *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp juga tidak berbahaya dan mudah ditemukan yaitu di tanah timbunan tempat sampah, sampel bakteri yang akan digunakan pada penelitian ini diambil dari TPA Gampong Jawa, Kota Banda Aceh. Bakteri ini dikembangkan di Laboratorium Microbiologi, Fakultas MIPA Universitas Syiah Kuala.

Bakteri ureolitik mampu mengendapkan kalsium karbonat (kalsit) dengan menghasilkan enzim urease, yang menghidrolisis urease menjadi amonia dan CO<sup>2</sup>, meningkatkan pH dan konsentrasi karbonat. Sesuai penelitian yang telah ada bakteri ureolitik merupakan kelompok *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp, gram positif dan memiliki aktivitas enzim urease yang dapat diisolasi dari tanah kebun, tanah di sekitar pabrik semen dan tanah di tempat pembuangan akhir (Bharathi, 2014).

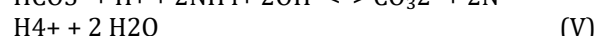
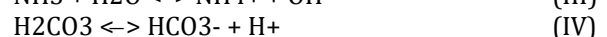
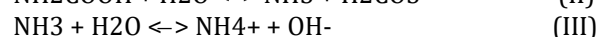
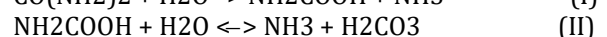
Beton mutu tinggi memiliki sifat-sifat khusus yang berbeda dengan beton biasa, seperti mempunyai kuat tekan yang tinggi, permeabilitas yang rendah sehingga beton tersebut cukup tahan terhadap berbagai reaksi fisika dan kimia yang dapat merusak beton (Ginting, 2019).

Bakteri ureolitik merupakan mikroorganisme yang mampu menghasilkan urease serta menghidrolisis urea. Bakteri ureolitik mampu mengendapkan kalsium karbonat (CaCO<sup>3</sup>) oleh bakteri merupakan proses mineralisasi biologis. (Rajasekar, dkk, 2021) dikutip dari (Fitri, dkk, 2023).

Beberapa genus yang termasuk bakteri ini yaitu *Bacillus*, *Solibacillus*, *Staphylococcus*, *Neisseria*, *Yersinia*, dan *Klebiella*. Dari beberapa genus bakteri tersebut, yang sering digunakan dalam campuran beton bakteri adalah *bacillus*. Bakteri ureolitik dari genus *bacillus* yang telah digunakan dalam campuran beton untuk mengatasi keretakan beton yaitu *bacillus sphaericus*, *bacillus cohnii*, dan *bacillus cereus*. Hanya bakteri yang memiliki daya tahan yang tinggi yang mampu digunakan, mengingat kondisi beton yang kering, hidrasi tinggi dan basa bisa menyebabkan bakteri mati. Maka perlu dicari bakteri yang mampu hidup dikondisi yang sama dengan kondisi pada beton tersebut, dan salah satu bakteri yang mampu hidup dan aktif pada kondisi yang sama dan bahkan lebih ekstrim yaitu bakteri ureolitik dengan genus *Bacillus*. Bakteri ini ditemukan dapat hidup di dalam batuan, di dalam kerak bumi dan gurun pasir. Bakteri *Bacillus* sp. mampu menghasilkan endospora yang dapat hidup bahkan lebih dari 200 tahun pada kondisi ekstrim (Jonkers, 2007).

Bakteri yang akan digunakan yaitu *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp, terkenal dengan sifat anaerob, bebas untuk memperoleh energinya dan aktivitasnya dalam larutan alkali yang tinggi. Semakin banyak endapan CaCO<sub>3</sub>, semakin baik pengaruh penyembuhan diri. Konsentrasi bakteri, urea serta Ca<sup>2+</sup> akan sangat mempengaruhi jumlah CaCO<sub>3</sub> yang mengendap. Serangkaian tes dilakukan untuk menyelidiki konsentrasi optimal bakteri, urea dan Ca<sup>2+</sup> (Wang, dkk, 2010).

Proses pembentukan CaCO<sub>3</sub> (kalsit) yang dilakukan oleh bakteri, menurut (Chou, dkk, 2020) persamaan reaksi yang terjadi dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi yang terjadi pada persamaan (I) yaitu urea terhidrolisis menjadi amonia serta karbonat. persamaan (II) menunjukkan hasil persamaan (I) terhidrolisis menjadi 1 amonia dan asam karbonat. Selajutnya pada persamaan (III dan IV) mengalami kesetimbangan dengan air sehingga membentuk biokarbonat dan ammonium serta hidroksida. Pembentukan ion hidroksida menyebabkan pH naik dan menggeser biokarbonat. Hal ini menyebabkan ion terbentuk (V). dan ammonium yang dikeluarkan ke lingkungan. Setelahnya kalsium, yang telah mencapai kejenuhan tertentu akan mengakibatkan pengendapan kalsium karbonat pada dinding sel bakteri dan membuat seluruh sel terselubung dengan endapan tersebut (Chou, dkk, 2020).

Metode yang digunakan pada saat pencampuran bakteri dalam beton merupakan enkapsulasi, yaitu metode yang digunakan untuk memasukkan bakteri ke dalam campuran beton dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja beton. Dalam metode ini, bakteri dimasukkan ke dalam enkapsulasi khusus sebelum dicampur dengan beton (Khaliq dan Ehsan, 2016).

Bakteri yang digunakan dalam campuran beton harus memiliki kemampuan bertahan dalam lingkungan yang bersifat basa, mengingat beton cenderung memiliki sifat basa. Bakteri yang telah dienkapsulasi dan dicampur dalam campuran beton akan menjadi aktif ketika terjadi retakan pada beton, yang menyebabkan pecahnya enkapsulasi bakteri. Bakteri ini kemudian akan menghasilkan kalsium karbonat yang akan mengisi retakan tersebut dan mengikat bahan lain seperti kerikil dan pasir dalam beton. Setelah retakan terisi penuh dengan kalsium karbonat, bakteri akan kembali ke kondisi tidak aktif. Namun, jika terjadi retakan lagi, bakteri akan kembali aktif untuk mengatasi masalah tersebut (Vijay, dkk, 2017).

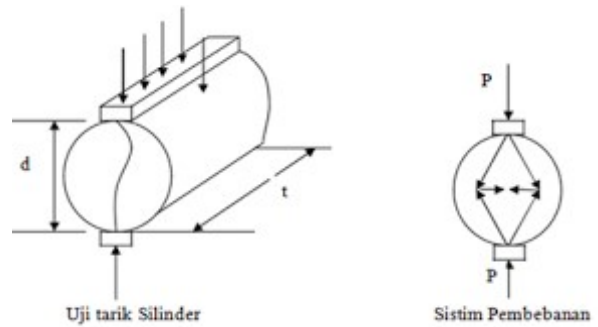
Kuat tarik belah adalah nilai kekuatan tarik tidak langsung dari beton silinder, diukur dengan memuat benda uji secara horizontal di atas meja penekan mesin uji. Parameter ini penting untuk mengevaluasi kekuatan beton. Nilai kekuatan tekan dan tarik beton tidak selalu sebanding, dan usaha meningkatkan kekuatan tekan cenderung hanya sedikit meningkatkan kekuatannya. Salah satu kelemahan beton adalah kekuatannya yang rendah, sekitar 10-15%, bahkan kadang-kadang hanya 20% dari kekuatan tekannya (Haibaho dkk, 2020). Pengujian kuat tarik belah dilakukan setelah memberikan beban awal pada beton untuk menyebabkan retakan, dengan retakan sangat halus (10-30µm) terjadi pada beban 10-55%.

Pengujian kuat tarik belah beton dilakukan dengan menggunakan benda uji silinder 15 cm x 30 cm sesuai

prosedur ASTM C496/C496M-17. Kuat tarik belah dihitung dengan persamaan didapat melalui persamaan 1:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi L.D} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:  
 $f_{ct}$  = Kuat tarik belah (MPa);  
 P = Beban tekan maksimum saat silinder beton terbelah/runtuh (N);  
 L = Panjang/tinggi benda uji (mm); dan  
 D = Diameter benda uji dalam (mm).



**Gambar 1** Pengujian Kuat Tarik Belah

Sumber: SNI 03-2491-2002

Hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah beton sudah banyak diteliti oleh para ahli dibidang beton. Dalam SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.5 ditetapkan bahwa besarnya nilai kuat tarik memiliki hubungan dengan nilai kuat tekan beton, dengan persamaan 2.8

$$f_{ct} = 0,70 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:  
 $f_{ct}$  = Nilai kuat tarik belah (MPa)  
 $f'_c$  = Nilai kuat tekan beton (MPa)

Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan juga merupakan faktor yang mempengaruhi nilai kuat tarik belah secara signifikan. Faktor yang mempengaruhi kuat tarik belah tersebut adalah pengaruh ukuran, pengaruh rasio diameter spesimen-ukuran agregat, pengaruh rasio panjang-diameter, pengaruh kondisi kelembaban benda uji dan pengaruh karakteristik mesin uji (Renaldo, dkk, 2014)

Pengamatan kondisi benda uji secara visual bertujuan untuk melihat apakah bakteri mampu melakukan presipitasi dan menutup permukaan retak diluar pada benda uji. Pada proses pengamatan akan dilihat kristal yang terbentuk pada keretakan yang ditandai dengan adanya material berwarna keputih-putihan yang mengisi retak pada beton. Pada penelitian ini, pengamatan dilakukan setiap 7 hari sekali hingga hari

ke 28 pasca benda uji diberikan retak. Kemunculan kalsit dalam perbaikan akan dihitung perbaikannya dalam menutup retak dengan mencari rasio perbaikan (Intarasontron, dkk, 2021), perhitungan rasio perbaikan permukaan retak dapat dihitung dengan persamaan (3) berikut:

$$\text{Rasio Perbaikan (\%)} = \frac{\text{Panjang perbaikan retak (cm)}}{\text{panjang retak total (cm)}} \times 100$$

% .....

Scanning Electronic Microscope (SEM) adalah alat yang digunakan dalam mikroskopi elektron untuk memvisualisasikan sampel dengan resolusi tinggi. SEM bekerja dengan memancarkan aliran elektron berenergi tinggi ke arah permukaan sampel dan menghasilkan gambar kristal-kristal slag yang berfungsi sebagai pengisi rongga yang terdapat antara lekatan agregat dengan pasta semen, sehingga daerah yang berongga tersebut akan menjadi lebih padat dan mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dan jumlah rongga yang terdapat pada campuran beton yang mengandung steel slag lebih kecil dan lebih sedikit (Wirma, dkk, 2016).

(Huynh, dkk, 2017) dengan judul “*Bacillus Subtilis* HU58 Diimobilisasi dalam Mikropori Diatomit untuk digunakan dalam *Self-healing Concrete*” penelitian ini menjelaskan penggunaan tanah diatomae sebagai bahan enkapsulasi bakteri *Bacillus Subtilis* menjadi pelet kapsul dan kemudian dilapisi oleh pasta semen (w/c = 0,5) yang dibentuk ukuran pelet kapsul dengan ukuran 10 mm, dengan komposisi bakteri *Bacillus Subtilis* 0,49%, urea 0,44%, CaCl<sub>2</sub> dan nutrient broth 0,11%, sehingga enkapsulasi menggunakan tanah diatomae menjadi salah satu yang efisien untuk diterapkan pada *Self-Healing Concrete*.

(Rohini, I., dan Padmapriya, R. 2020) dengan judul “Pengaruh bakteri subtilitis pada beton limbah elektronik” Silinder Beton dengan ukuran diameter 15 cm x tinggi 30 cm. Silinder diuji untuk kekuatan tarik di akhir 28 hari menggunakan compression tester. Kuat tarik belah diamati 5 N/mm<sup>2</sup> dengan bakteri 0%, 5,52 N/mm<sup>2</sup> bakteri 1%, dan 6,46 N/mm<sup>2</sup> dengan bakteri 2%.

(Pachavannan, P., dkk, 2020) dengan judul “Analisis eksperimental sifat penyembuhan diri dari beton bakteri” hasil benda uji kuat tarik belah dengan umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari, yang didapatkan hasil beton bakteri umur 7 hari yaitu 1,22 N/mm<sup>2</sup>, umur 14 hari yaitu 2,62 N/mm<sup>2</sup>, dan umur 28 hari yaitu 3,76 N/mm<sup>2</sup>.

(Habeahann j, 2021) dengan judul “Kuat tekan beton pulih mandiri (*Self-Healing Concrete*) menggunakan bakteri *Bacillus Subtilis* dengan beberapa perawatan”

Perawatan beton bakteri dengan metode perendaman menghasilkan kuat tekan yang lebih baik dengan nilai kuat tekan maksimum adalah 26,32 MPa.

**METODE**

Penelitian ini melakukan pengujian kuat tarik belah. Variabel yang digunakan adalah 3 sampel bakteri yang dipakai yaitu *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp, untuk mengetahui kegetasan yang telah dicampur oleh bakteri, setiap variasi menggunakan benda uji silinder diameter Ø15 cm x tinggi 30 cm. Pemberian retak awal diberikan 7 hari setelah perendaman beton dan diberikan kekuatan tekan sebesar 80% dari kuat tekan beton rencana f'c 50 MPa dan pengecekan perkembangan bakteri dilakukan setiap 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari. Pengujian kuat tarik belah diuji pada umur 28 hari, dengan total 45 sampel benda uji dengan pembagian 15 benda uji untuk satu variasi bakteri pada benda uji silinder. Variasi bakteri dan benda uji disajikan pada Tabel 1.

**Tabel 1** Variasi bakteri dan benda uji

Nama Benda Uji	Bakteri (%)	NB (%)	Urea (%)	CaCl <sub>2</sub> . H <sub>2</sub> O (%)	Jumlah Benda Uji
Benda Uji Silinder Bakteri <i>Solibacillus</i> sp.					
BO 0%	0	0	0	0	1
BO 0,5%	0,5	0,11	0,44	0,22	5
BO 0,6%	0,6	0,13	0,53	0,27	5
BO 0,7%	0,7	0,16	0,62	0,31	5
Benda Uji Silinder Bakteri <i>Bacillus</i> sp.					
BU 0%	0	0	0	0	1
BU 0,5%	0,5	0,11	0,44	0,22	5
BU 0,6%	0,6	0,13	0,53	0,27	5
BU 0,7%	0,7	0,16	0,62	0,31	5
Benda Uji Silinder Bakteri <i>Staphylococcus</i> sp.					
BSC 0%	0	0	0	0	1
BSC 0,5%	0,5	0,11	0,44	0,22	5
BSC 0,6%	0,6	0,13	0,53	0,27	5
BSC 0,7%	0,7	0,16	0,62	0,31	5
Jumlah Total:					48

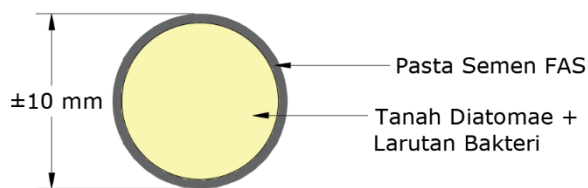
Pembuatan enkapsulasi bakteri *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp dengan tanah diatomae dilakukan di Laboratorium Mikrobiologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Syiah Kuala. Bakteri yang telah didapatkan dilakukan pengembangbiakan dan peremajaan. Komposisi campuran bakteri merupakan pengembangan yang dilakukan oleh (Huynh, dkk, 2017), komposisi yang digunakan pada

pengecoran 1 m<sup>3</sup> penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2** Komposisi Enkapsulasi Bakteri 1 m<sup>3</sup> Pengecoran

Konse trasi	Bakteri	Urea (kg)	CaCl <sub>2</sub> (kg)	NB (kg)	Tanah Diatomae (kg)
0,5%	3,07	2,70	1,35	0,67	85,47
0,6%	3,68	3,23	1,66	0,80	85,47
0,7%	4,29	3,80	1,90	0,98	85,47

Secara detail, bentuk enkapsulasi yang dihasilkan seperti yang tercantum pada Gambar 2 sebagai berikut.



**Gambar 2** Detail Enkapsulasi Bakteri dengan Tanah Diatomae

Reaksi pelet enkapsulasi bakteri yang telah dibuat dapat dilihat pelet enkapsulasi bakteri berhasil bereaksi dengan menunjukkan bubuk putih atau kalsit, yang muncul pada keretakan lapisan semen pada enkapsulasi, yang menunjukkan bahwa bakteri mampu bereaksi setelah diberi pasta semen yang tercantum pada Gambar 3 dibawah ini, setelah melakukan perawatan didalam air selama 28 hari.



**Gambar 3** Media Enkapsulasi Bakteri Setelah Direndam Selama 14 Hari

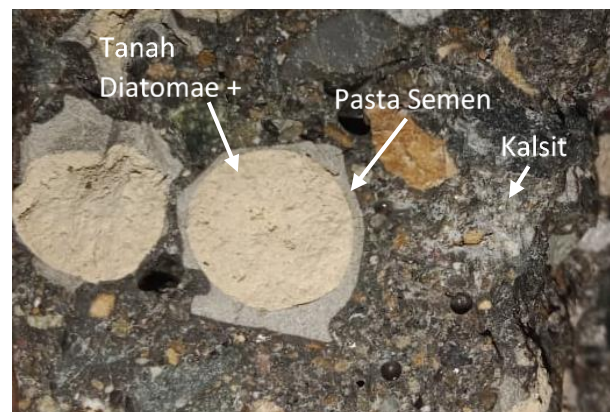
Hasil reaksi pelet enkapsulasi bakteri setelah diuji 28 hari, pelet enkapsulasi bakteri berhasil bereaksi dengan menunjukkan bubuk putih atau kalsit yang muncul retakan di dalam beton yang tercantum pada Gambar 4.

Dalam proses penambahan pelet enkapsulasi bakteri pada benda uji, dilakukan secara bertahap dengan menaburkan pelet enkapsulasi yang berbentuk lingkaran kedalam campuran beton, dapat dilihat pada Gambar 5, pada saat pengerjaan pembuatan benda uji.

Benda uji yang dibuat adalah silinder standar dengan ukuran Ø15 cm, tinggi 30 cm sebanyak 15 benda uji variasi satu jenis bakteri, dengan rincian 45 benda uji beton mutu tinggi. Jenis dan Jumlah benda uji disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3** Jenis Bakteri dan Jumlah Benda Uji dengan Variasi 3 Bakteri

Jenis Bakteri	Diameter	Silinder
Solibacillus sp	Ø15 cm x 30 cm	15
Bacillus sp	Ø15 cm x 30 cm	15
Staphylococcus sp	Ø15 cm x 30 cm	15
Total		45



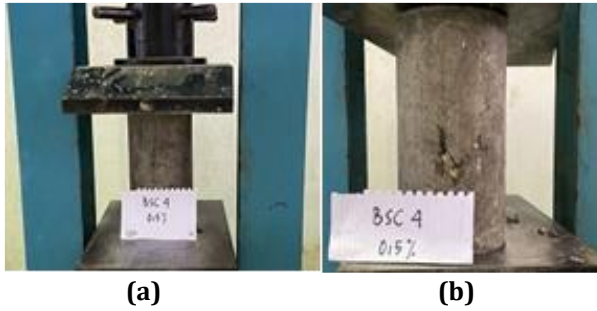
**Gambar 4** Hasil Media Enkapsulasi Bakteri Setelah Direndam Selama 28 Hari



**Gambar 5** Proses Penambahan Pelet Enkapsulasi Bakteri pada Benda Uji

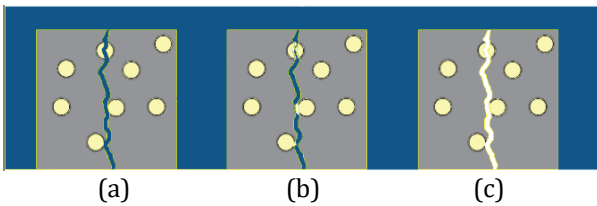
Benda uji diberi retakan dengan cara memberikan beban tekan yang distandarkan yaitu sebesar 80% dari kuat tekan rencana 50 MPa. Pemberian kuat tekan sebesar 30 MPa atau jika dihitung dalam ton berdasarkan satuan pada mesin uji tekan yaitu 54 ton. Pemberian retak diberikan pada umur beton 7 hari setelah perendaman (Depaa dan Felix Kala, 2015). Pemberian retak pada benda uji dapat dilihat pada Gambar 6.

Pengamatan ini dilakukan dengan cara melihat kondisi beton sebelum dilakukan pengujian kuat tarik belah. Pengamatan ini dilakukan setiap 7 hari sekali hingga hari ke 28 perawatan. Pengamatan dilakukan untuk melihat terjadinya penutupan permukaan retak oleh kalsit. Retak yang ditinjau dilakukan



**Gambar 6** Pemberian Retak pada Benda Uji (a) Setting Kuat Tekan Benda Uji, (b) Retak yang terbentuk

pemotretan dengan tempat dan jarak yang sama untuk melihat perbedaan perbaikan retak setiap minggunya. Skema perbaikan retakan oleh bakteri dapat di lihat pada Gambar 7.



**Gambar 7** Skema Perbaikan Retak Oleh Bakteri (a) Air Masuk Mengisi Retak, (b) Kalsit Mulai Terbentuk, (c) Kalsit Mulai Menutup Retak

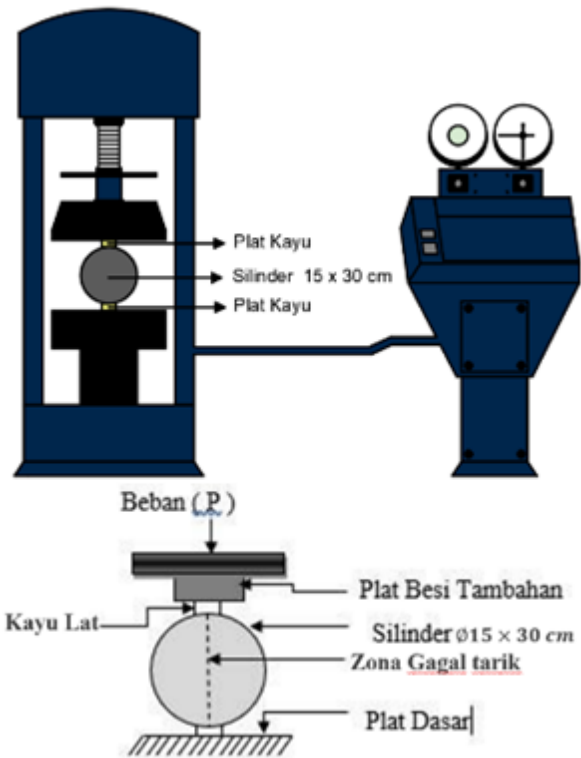
Keterangan warna:

- (a) = Air
- (b) = Enkapsulasi Bakteri
- (c) = Kalsit

Pengujian kuat tarik belah menggunakan *compression strength tester* yang tersedia di laboratorium. Pelaksanaan kuat tarik belah beton dengan menggunakan benda uji silinder beton berukuran  $\varnothing 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  sesuai dengan ASTM C496/C496 -11. Uji tarik belah dilakukan dengan memberikan tegangan tarik pada beton secara tidak langsung. Pemasangan alat uji dapat dilihat pada Gambar 8.

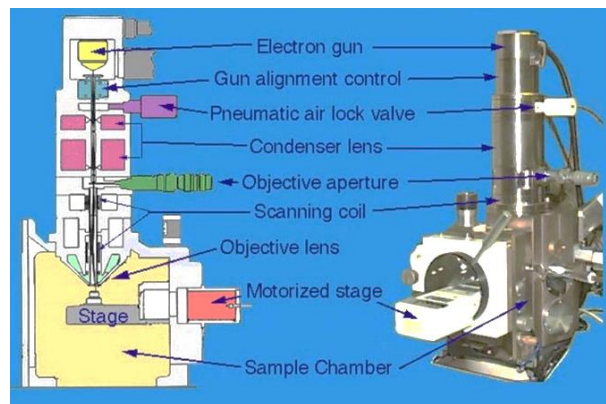
Langkah-langkah pengujian kuat tarik belah sebagai berikut:

- Silinder yang diuji adalah silinder yang telah dikeluarkan 1 hari dari bak perendaman sebelum pemberian retakan;
- Setiap benda uji ditimbang beratnya;
- Silinder kemudian diletakkan dimesin tekan dengan posisi tertidur; dan
- Letakan bantalan kayu dengan panjang 30 cm yang disisipkan antara silinder yang posisinya tertidur dan alas mesin uji untuk mentransfer beban dari mesin kuat tekan ke benda uji. Benda uji diberi tekanan hingga terbelah.



**Gambar 8** Setting Alat Pengujian Kuat Tarik Belah  
Sumber: Haibaho dkk (2020)

Pengujian *Scanning Electronic Microscope (SEM)* alat yang digunakan dalam mikroskopi elektron untuk memvisualisasikan sampel dengan resolusi tinggi, dilakukan di laboratorium Universitas Gadjah Mada (UGM). Uji SEM dilakukan dengan menggunakan benda uji yang telah di uji kuat tarik belah dan butiran keping dari betonnya dihaluskan. Skema pengujian SEM dapat dilihat pada Gambar 9.



**Gambar 9** Skema Alat *Scanning Electronic Microscop (SEM)*

Sumber: Fahrizal (2016)

Langkah-langkah pengujian *Scanning Electronic Microscope (SEM)* sebagai berikut:

- Persiapan sampel beton mutu tinggi untuk pengujian SEM yang sudah dihaluskan berukuran butiran 10 mm;

- Nyalakan SEM dan biarkan sistem mencapai tekanan vakum yang diperlukan untuk pengujian;
- Fokus sampel sehingga mendapatkan gambar yang jelas dan tajam dengan menggunakan lensa objektif untuk melakukan fokus dengan baik;
- Mulai pemindaian dengan mengarahkan balok elektron pada sampel dengan pola yang telah ditentukan;
- Ambil gambar dari area yang diminati dengan menggunakan detektor yang sesuai;
- Setelah pengambilan gambar selesai, dapat mengolah data dan gambar yang dihasilkan untuk analisis lebih lanjut, seperti mengukur ukuran partikel;
- Setelah selesai, pastikan untuk membersihkan dan merawat instrumen SEM;

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian kuat tarik belah benda uji 28 hari pasca pemberian retak, setelah benda uji yang mengalami retak dilakukan pemulihan selama 28 hari, benda uji tersebut dilakukan pengujian kuat tarik belah. Tujuannya adalah untuk mengetahui besar kuat tarik belah beton pasca pemberian retak. Nilai kuat tarik belah tersebut ditampilkan pada Tabel 4 berikut.

**Tabel 4** Nilai Kuat Tarik Belah Uji Pasca Pemulihan

Variasi Bakteri	Nama Benda Uji	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Tarik Belah Rata-rata (MPa)
<b>Benda Uji Silinder Bakteri <i>Solibacillus</i> sp.</b>			
0,5%	BO 51	4,52	4,32
	BO 52	4,33	
	BO 53	4,42	
	BO 53	4,14	
	BO 53	4,21	
0,6%	BO 61	5,16	4,48
	BO 62	4,15	
	BO 63	4,42	
	BO 63	4,54	
	BO 63	4,14	
0,7%	BO 71	4,35	4,58
	BO 72	4,74	
	BO 73	4,43	
	BO 74	5,24	
	BO 75	4,14	
<b>Benda Uji Silinder Bakteri <i>Bacillus</i> sp.</b>			
0,5%	BU 51	4,27	4,42
	BU 52	4,32	
	BU 53	4,51	
	BU 54	4,15	
	BU 55	4,86	
0,6%	BU 61	4,47	4,48

Variasi Bakteri	Nama Benda Uji	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Tarik Belah Rata-rata (MPa)
0,7%	BU 62	4,63	4,64
	BU 63	4,63	
	BU 64	3,99	
	BU 65	4,69	
	BU 71	4,36	
	BU 72	4,48	
	BU 73	4,56	
	BU 74	4,83	
<b>Benda Uji Silinder Bakteri <i>Staphylococcus</i> sp.</b>			
0,5%	BSC 51	4,89	5,38
	BSC 52	5,85	
	BSC 53	4,84	
	BSC 54	6,48	
	BSC 55	4,86	
0,6%	BSC 61	7,47	5,53
	BSC 62	6,52	
	BSC 63	4,84	
	BSC 64	4,11	
	BSC 65	4,69	
0,7%	BSC 71	5,18	5,53
	BSC 72	5,71	
	BSC 73	4,20	
	BSC 74	7,60	
	BSC 75	4,97	

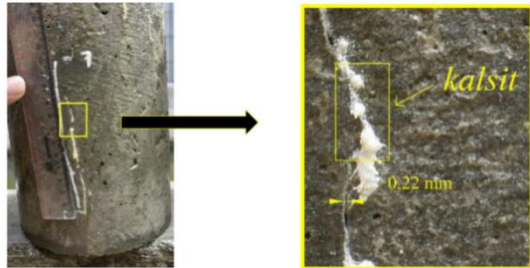
Pengujian kuat tarik belah dan kuat tekan benda uji tanpa retak pada umur 28 hari pasca pemberian retak, peneliti juga melakukan pengujian kuat tarik belah ultimit pada benda uji beton kontrol. Hasil pengujian akan ditampilkan dalam Tabel 5.

**Tabel 5** Nilai Kuat Tarik Belah Ultimate

Variasi Bakteri	Nama Benda Uji	Kuat Tarik Belah Ultimit (Mpa)	Rata-rata
0%	B01UB	5,57	5,35
	B02UB	5,39	
	B03UB	5,09	

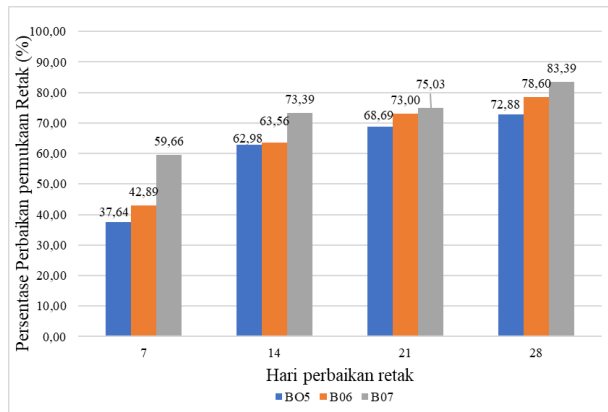
Masa pemulihan benda uji dilakukan dengan cara perendaman selama 28 hari, dalam penelitian ini dilakukan pengamatan untuk mengetahui keberhasilan kemunculan kalsit sebagai produk dari reaksi yang terjadi dan perbaikan penutupan permukaan retak pada benda uji tersebut. Benda uji diamati secara visual untuk melihat kondisi perkembangan kalsit dalam hal menutup retak setiap 1 minggu (7 hari) selama 28 hari perendaman pasca pemberian retak. Setelah 28 hari terlihat kemunculan kalsit. Berdasarkan pengamatan yang dilakukan,

kemunculan kalsit yang menutup permukaan retak pada benda uji dengan variasi jumlah bakteri yang berbeda mengalami progres perbaikan yang berbeda pula pada setiap minggunya. Secara visual perkembangan kalsium karbonat (CaCO<sub>3</sub>) diperlihatkan pada Gambar 10.



**Gambar 10** Hasil Pemulihan Permukaan (a) Benda Uji Pasca Pemulihan (b) Kalsit Sebagai Produk Pemulihan

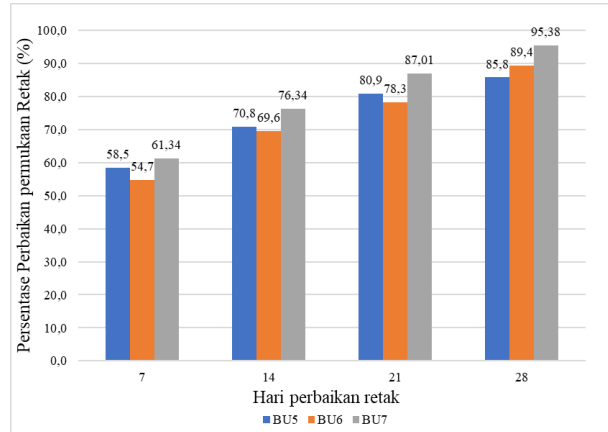
Berdasarkan hasil pengamatan pada beton mutu tinggi dengan tambahan bakteri, persentase perbaikan retak pada beton paling tinggi hingga terendah pada 28 hari perbaikan terjadi pada benda uji berturut-turut adalah benda uji dengan persentase bakteri *solibacillus* 0,7% yaitu sebesar 83,39%, benda uji dengan persentase bakteri 0,6% yaitu sebesar 78,6%, dan benda uji dengan persentase bakteri 0,5% yaitu sebesar 72,88%, grafik perbaikan retakan oleh kalsit dapat dilihat Gambar 11.



**Gambar 11** Grafik Perbaikan Retakan oleh Kalsit dengan Bakteri *Solibacillus* sp

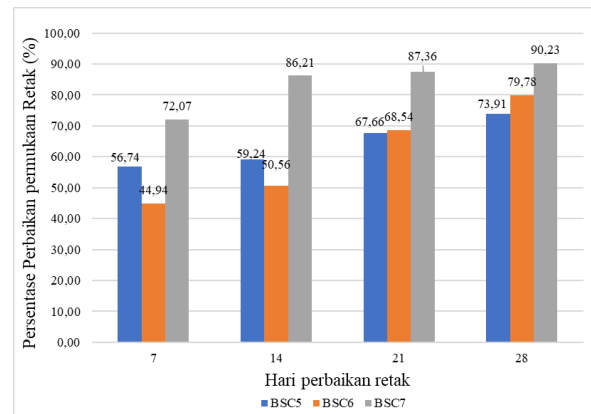
Benda uji dengan persentase bakteri *bacillus* 0,7% yaitu sebesar 95,38%, benda uji dengan persentase bakteri 0,6% yaitu sebesar 89,4%, dan benda uji dengan persentase bakteri 0,5% yaitu sebesar 85,8%, grafik perbaikan retakan oleh kalsit dapat dilihat Gambar 12.

Benda uji dengan persentase bakteri *staphylococcus* 0,7% yaitu sebesar 90,23%, benda uji dengan persentase bakteri 0,6% yaitu sebesar 79,78%, dan



**Gambar 12** Grafik Perbaikan Retakan oleh Kalsit dengan Bakteri *Bacillus* sp

benda uji dengan persentase bakteri 0,5% yaitu sebesar 73,91%, grafik perbaikan retakan oleh kalsit dapat dilihat Gambar 13.



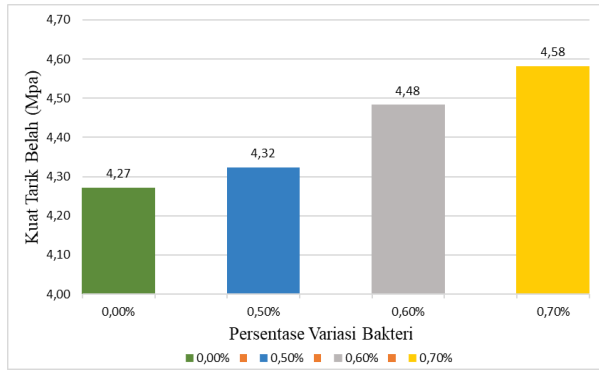
**Gambar 13** Grafik Perbaikan Retakan oleh Kalsit dengan Bakteri *Staphylococcus* sp

Terkait nilai kuat tarik belah beton, dari hasil pengujian didapatkan nilai kuat tarik belah beton dengan campuran enkapsulasi bakteri *solibacillus* sp dari tertinggi ke terendah berturut turut adalah benda uji dengan persentase bakteri 0,7% sebesar 4,58 MPa, benda uji dengan persentase bakteri 0,6% sebesar 4,48 MPa, benda uji dengan persentase bakteri 0,5% sebesar 4,32 MPa, dan benda uji dengan persentase bakteri 0,0% sebesar 4,27 MPa.

Nilai kuat tarik belah beton dengan campuran enkapsulasi bakteri *bacillus* sp dari tertinggi ke terendah berturut turut adalah benda uji dengan persentase bakteri 0,7% sebesar 4,64 MPa, benda uji dengan persentase bakteri 0,6% sebesar 4,48 MPa, dan benda uji dengan persentase bakteri 0,5% sebesar 4,42 MPa.

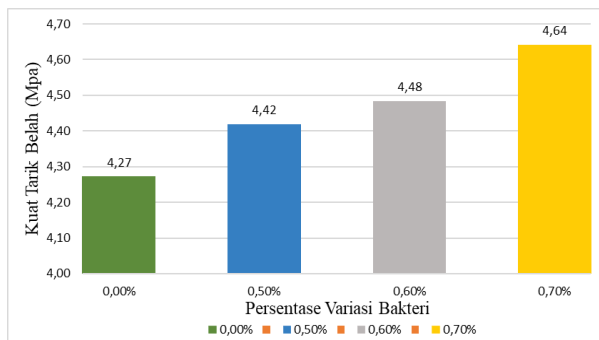
Nilai kuat tarik belah beton dengan campuran enkapsulasi bakteri *staphylococcus* sp dari tertinggi ke terendah berturut turut adalah benda uji dengan





**Gambar 14** Grafik Perbaikan Retakan oleh Kalsit dengan Bakteri *Solibacillus* sp

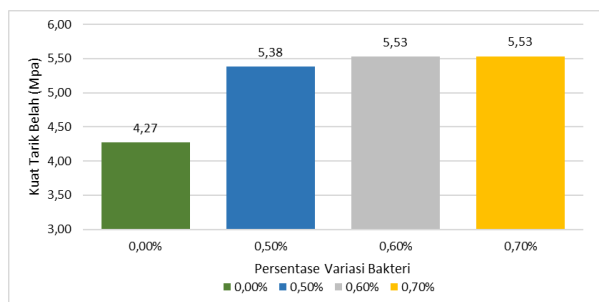
persentase bakteri 0,7% sebesar 5,53 MPa, benda uji dengan persentase bakteri 0,6% sebesar 5,53 MPa, dan benda uji dengan persentase bakteri 0,5% sebesar 5,38 MPa.



**Gambar 15** Grafik Perbaikan Retakan oleh Kalsit dengan Bakteri *Bacillus* sp

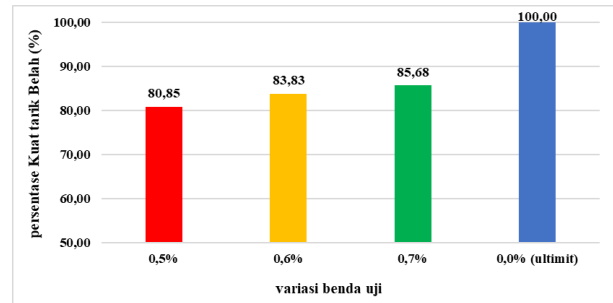
Pada hasil penelitian terjadi peningkatan nilai kuat tarik belah pada persentase 0,7% bakteri. Hal tersebut bisa disebabkan karena perkembangan kalsit sangat baik, disebabkan oleh pengisian pori-pori dan rongga di dalam beton mutu tinggi oleh pengendapan mineral yang dibentuk oleh aktivitas bakteri, sehingga pori-pori pada beton mikro menjadi padat.

Berdasarkan nilai kuat tarik belah yang didapat, peneliti melakukan perhitungan rasio perbaikan kuat tarik belah benda uji dengan campuran bakteri terhadap kuat tarik belah ultimit beton kontrol. Dari



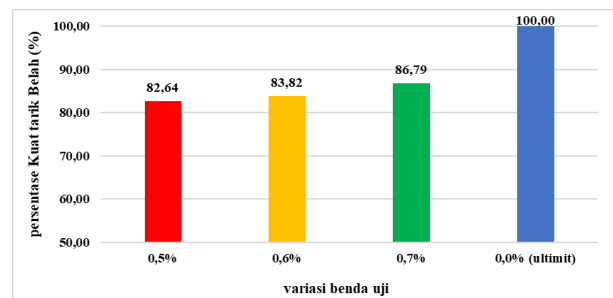
**Gambar 16** Grafik Perbaikan Retakan oleh Kalsit dengan Bakteri *Staphylococcus* sp

hasil perhitungan didapat besar perbaikan benda uji pasca pemulihan retak dengan memakai bakteri *solibacillus* sp, hingga hari ke 28 mampu mengalami perbaikan lebih dari 80% terhadap kuat tarik belah ultimit beton kontrol. Bahkan pada benda uji dengan variasi bakteri 0,7% mengalami perbaikan mencapai 85,68%. Hal ini membuktikan bahwa penambahan enkapsulasi bakteri berpengaruh terhadap perbaikan nilai kuat tarik belah, meskipun tidak mencapai pada kondisi ultimit 100%. Dapat dilihat pada Gambar 17.



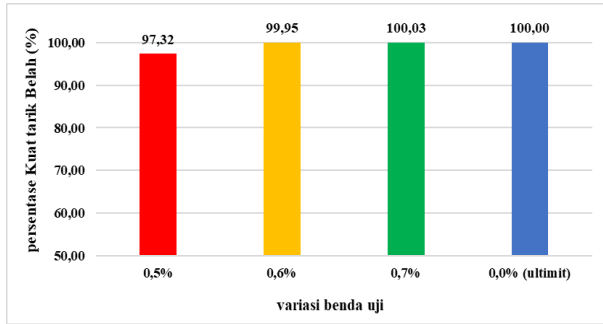
**Gambar 17** Grafik Persentase Kuat Tarik Belah dengan Beban Ultimit Bakteri *Solibacillus*

Dari hasil perhitungan didapat besar perbaikan benda uji pasca pemulihan retak dengan memakai bakteri *bacillus* sp, hingga hari ke 28 mampu mengalami perbaikan lebih dari 80% terhadap kuat tarik belah ultimit beton kontrol. Bahkan pada benda uji dengan variasi bakteri 0,7% mengalami perbaikan mencapai 86,79%. Hal ini membuktikan bahwa penambahan enkapsulasi bakteri berpengaruh terhadap perbaikan nilai kuat tarik belah, meskipun tidak mencapai kondisi ultimit 100%. Dapat dilihat pada Gambar 18.



**Gambar 18** Grafik Persentase Kuat Tarik Belah dengan Beban Ultimit Bakteri *Bacillus*

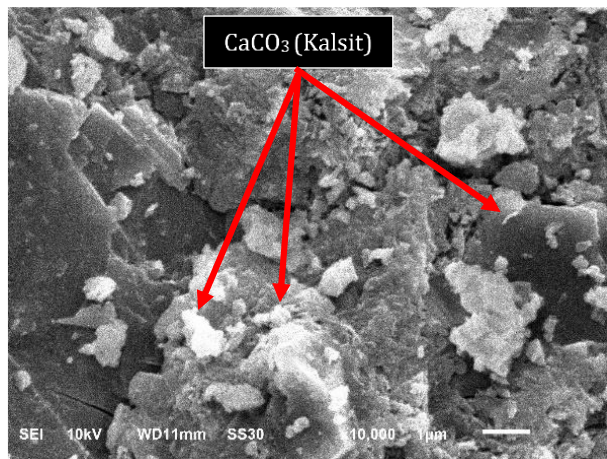
Dari hasil perhitungan didapat besar perbaikan benda uji pasca pemulihan retak dengan memakai bakteri *staphylococcus* sp, hingga hari ke 28 mampu mengalami perbaikan lebih dari 100% terhadap kuat tarik belah ultimit beton kontrol. Bahkan pada benda uji dengan variasi bakteri 0,7% mengalami perbaikan mencapai 100,03%. Hal ini membuktikan bahwa penambahan enkapsulasi bakteri berpengaruh terhadap perbaikan nilai kuat tarik belah, melebihi kondisi ultimit 100%. Dapat dilihat pada Gambar 19.



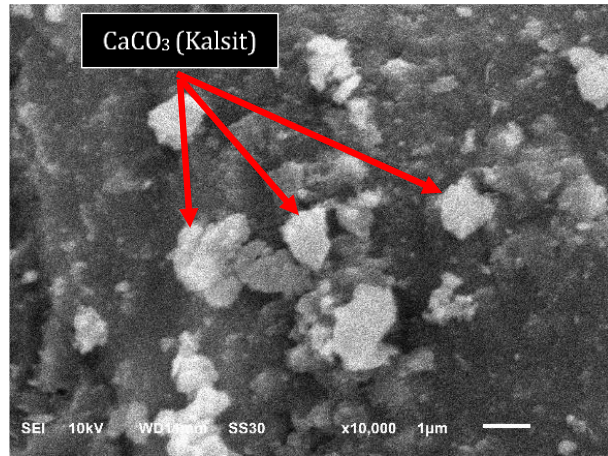
**Gambar 19** Grafik Persentase Kuat Tarik Belah dengan Beban Ultimit Bakteri *Staphylococcus*

Pengendapan kalsium dalam beton yang dicampurkan 3 bakteri yaitu *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp dengan hasil analisis SEM. Berdasarkan Gambar 20, Gambar 21, dan Gambar 22 bakteri ditemukan dalam kontak yang dekat dengan kristal kalsit. Pada pengamatan lebih dekat, ditemukan bakteri berbentuk batang yang berhubungan dengan kristal kalsit. Kehadiran kristal kalsit ini berfungsi sebagai penghalang masuknya zat berbahaya dan meningkatkan impermeabilitasnya. (Achal, dkk, 2011). Penambahan bakteri ke dalam beton dapat memperbaiki struktur mikro beton melalui pengendapan mineral. Hal tersebut telah diverifikasi oleh analisis SEM, dengan penambahan konsentrasi 3 bakteri *solibacillus* sp, *bacillus* sp, dan *staphylococcus* sp sebesar  $1,5 \times 10^8$  CFU/ml.

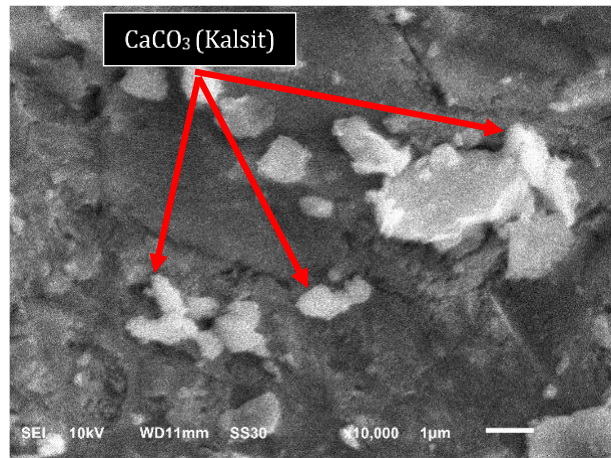
Kekuatan beton sehingga meningkat dengan adanya penambahan bakteri, akibat pengendapan kalsium karbonat di pori-pori dan hal ini dikonfirmasi dengan menggunakan citra SEM, melaporkan bahwa endapan kalsium karbonat dalam retakan sampel uji dikonfirmasi oleh hasil yang diperoleh dengan menggunakan mikrostruktur sehingga dapat diketahui penurunan penyerapan air serta permeabilitas klorida.



**Gambar 20** Morfologi Hasil Uji SEM dengan Bakteri *Solibacillus* sp



**Gambar 21** Morfologi Hasil Uji SEM dengan Bakteri *Bacillus* sp



**Gambar 22** Morfologi Hasil Uji SEM dengan Bakteri *Staphylococcus* sp

## KESIMPULAN

Telah terbukti bahwa penggunaan bakteri dalam proses penyegelan keretakan pada beton berjalan efektif. Terdapat berbagai jenis bakteri yang dapat digunakan untuk menyegel keretakan mikro. Penggunaan bakteri sebagai agen *self-healing* berpengaruh positif karena dapat meningkatkan kuat tarik belah, mengurangi penyerapan air, dan menurunkan permeabilitas beton. Analisa mikrostruktur menunjukkan bahwa beton mikroba dapat menjadi alternatif solusi keretakan pada beton yang hemat biaya, ramah lingkungan, dan pada akhirnya mengarah pada peningkatan keawetan bahan bangunan.

Penambahan enkapsulasi dengan 3 variasi bakteri berpengaruh terhadap nilai kuat tarik belah beton mutu tinggi. Nilai kuat tarik belah optimum didapatkan pada beton mutu tinggi bakteri *staphylococcus* dengan rata-rata 5,48 MPa. Penambahan enkapsulasi bakteri juga mampu

meningkatkan nilai perbaikan kuat tarik belah terhadap nilai kuat tarik belah ultimit diatas 100%. Nilai perbaikan kuat tarik belah tertinggi dihasilkan oleh variasi bakteri *staphylococcus* dengan rata-rata 99%.

Penambahan enkapsulasi bakteri dalam beton mutu tinggi mampu memperbaiki keretakan pada beton mutu tinggi. Penggunaan enkapsulasi 3 variasi bakteri yaitu *solibacillus*, *bacillus*, dan *staphylococcus*, menggunakan tanah diatomae dengan jumlah bakteri yang lebih banyak memiliki progres perbaikan yang lebih baik pula. Dimana nilai progres perbaikan keretakan pada hari ke-28 oleh 3 variasi bakteri dari presentase bakteri 0,7% yang paling tertinggi hingga terendah terjadi pada bakteri *bacillus* dengan 95,38%, bakteri *staphylococcus* dengan 90,25%, dan bakteri *solibacillus* dengan 83,39%.

Berdasarkan hasil penelitian ini akan diberikan beberapa saran untuk kedepannya agar mampu dikembangkan lebih baik lagi oleh peneliti yang lain dan dapat menjadi contoh untuk penelitian yang berkenaan dengan topik ini. Perlu dilakukan perendaman yang lebih lama untuk mengetahui pengaruh kuat tekan atau kuat tarik belah. Saran kedepannya menambahkan tulangan untuk mlihat sifat susut, korosi dan karbonasi beton. Untuk peneliti selanjutnya diharapkan mempunyai inovasi lebih baik pada metode pencampuran enkapsulasi kedalam benda uji, sehingga penelitian kedepannya mendapatkan peningkatan lebih baik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Syiah Kuala atas dukungan finansialnya. Juga kepada Dr. Ir. Teuku Budi Aulia, S.T.Dipl,Ing, atas bimbingannya dan Dr. Ir. Yunita Idris, ST. M.Eng.Structure. yang telah memberikan kontribusi positif dalam penelitian ini. Semoga penelitian ini memberikan manfaat.

## DAFTAR PUSTAKA

Achal, V., Pan, X., and Özyurt, N. (2011). "Improved strength and durability of fly ash-amended concrete by  
Bharathi, N. (2014). Calcium Carbonate Precipitation with Growth Profile of Isolated Ureolytic Strains. International Journal of Science and Research, 3(9), 2045–2049.  
Chuo, S. C., Mohamed, S. F., Setapar, S. H. M., Ahmad, A., Jawaid, M., Wani, W. A., Yaqoob, A. A., & Ibrahim, M. N. M. (2020). Insights into the current trends in the utilization of bacteria for microbially induced calcium carbonate

precipitation. Materials, 13(21), 1–28. <https://doi.org/10.3390/ma13214993>  
DeBelie, W.DeMuynck. (2008). Crack repair in concrete using biodeposition, International conference on concrete repair, rehabilitation and retrofitting, 24–26 November, Cape Town, South Africa.  
Depaa, R. A. B., & Felix Kala, T. (2015). Experimental investigation of self healing behavior of concrete using Silica fume and GGBFS as mineral admixtures. Indian Journal of Science and Technology, 8(36).  
Fitri, L., Aulia, T. B., Fauzi, A., & Kamil, G. A. (2023). Characterization and screening of urease activity of ureolytic bacteria from landfills soil in Banda Aceh, Indonesia. Biodiversitas, 24(2),910–915. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240229>  
Ginting, A. (2019). Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur pada Berbagai Umur Beton. Jurnal Teknik Sipil, 7(2), 110–125.  
Habehan J. (2021). Kuat Tekan Beton Pulih Mandiri (Self-Healing Concrete) Menggunakan Bakteri Bacillus Subtilis Dengan Beberapa Metode Perawatan. Universitas Sriwijaya  
Haibaho, A., Sugiarto, A., Dewi, P. (2020). Jurusan, D., Sipil, T., & Malang, P. N. (n.d.). Prokons: Jurnal Teknik Sipil Studi Kelayakan Material Gunung Daerah Aliran Sungai Arah Malang-Kota Batu Dalam Penggunaannya Sebagai Salah Satu Material Beton. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i36/87644>  
Huynh, N. N. T., Phuong, N. M., Toan, N. P. A., & Son, N. K. 2017. Bacillus Subtilis HU58 Immobilized in Micropores of Diatomite for Using in Self-healing Concrete. Procedia Engineering, 171, 598–605.  
Intarasoontron, J., Pungrasmi, W., Nuaklong, P., Jongvivatsakul, P., & Likitlersuang, S. (2021). Comparing performances of MICP bacterial vegetative cell and microencapsulated bacterial spore methods on concrete crack healing. Construction and Building Materials, 302. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124227>  
Jonkers, H. M. (2007). Self Healing Concrete: A Biological Approach.  
Khaliq, W., & Ehsan, M. B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. Construction and Building Materials, 102, 349–357.  
Kristianingrum, S., & Sulastri, S. (2008). Pengaruh Berbagai Asam Terhadap Daya Adsorpsi Ion Kromium ( Iii ) Dan Kromium ( Vi ) Pada Tanah Diatomae. Jurnal Penelitian Saintek, 13(1), 77–94.  
Pachaiyannan, P., Hariharasudhan, C., Mohanasundram, M., & Anitha Bhavani, M. (2020). Experimental anaylsis of self-healing properties of bacterial concrete. Materials Today:

- Proceedings, 33, 3148–3154.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.782>
- Renaldo Glantino Regar, Marthin D. J. Sumajouw, Servie O. Dapas. (2014). Nilai kuat tarik belah beton dengan variasi ukuran dimengsi benda uji. Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado. *Jurnal Sipil Statik* Vol.2 No.5
- Rohini, I., & Padmapriya, R. (2020). Effect of bacteria subtilis on e-waste concrete. *Materials Today: Proceedings*, 42, 465–474.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.192>
- Tziviloglou, E.; Wiktor, V.; Jonkers, H. M.; & Schlangen, E. (2016), "Bacteria-based Self-Healing Concrete to Increase Liquid Tightness", *Construction and Building Materials*, Vol. 122, hlm. 118-125.
- Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete - A review. *Construction and Building Materials*, 152, 1008–1014.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>
- Wang, J. Y., Van Tittelboom, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Potential of applying bacteria to heal cracks in concrete. 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 1807–1818.
- Wirma, R., Kurniawandy, A., Jurusan, M., Sipil, T., Teknik, F., & Riau, U. (2016). Sifat Mekanis Beton Akibat Pengaruh Steel Slag Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus dengan Agregat Lokal Riau. In *Jom FTEKNIK* (Vol. 3, Issue 2).