BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batako

Batako termasuk ke dalam jenis material bangunan yang berbentuk bata beton yang dicetak untuk keperluan sebagai pasangan dinding pada konstruksi gedung. Bata beton yang bisa disebut batako merupakan material untuk konstruksi dinding yang tersusun atas campuran semen *portland*, air, dan agregat halus dengan menurut struktur materialnya dapat dikategorikan ke dalam dua jenis yaitu bata beton pejal dan bata beton berlubang (SNI 03-0349-1989). Dalam praktik konstruksi, batako sering dimanfaatkan sebagai elemen non-struktural sebagai pengisi dinding, pagar bangunan, dan pembatas ruang.

Pada saat pemasangan dinding batako memerlukan perhatian saat menentukan kelurusannya karena akan berdampak pada pekerjaan selanjutnya. Berdasarkan Anwar dkk. (2025), pemakaian batako sebagai pengaplikasian pada dinding memiliki kelebihan dan kekurangan sebagai berikut.

1. Kelebihan
    a. Memungkinkan tidak mengaplikasikan plesteran pada permukaan batako jika dilakukan pemasangan dengan rapi.
    b. Dengan mempunyai ukuran yang besar, maka dalam pemasangan dapat menghemat waktu dan biaya.
    c. Mempunyai karakteristik mudah dipotong sehingga mempermudah dalam pemasangan pada saat menemukan sambungan dinding yang perlu potongan batako.
2. Kekurangan
    a. Membutuhkan waktu lama pada pelaksanaan pembuatan batako sebelum digunakan pada pasangan dinding yaitu harus memiliki umur minimal 28 hari pada proses pemeliharaan jika tidak dilaksanakan pada ruang pemeliharaan yang khusus.

b. Dengan ukuran yang besar dan pengerasan yang cukup lama maka dapat mengakibatkan sering terjadi pecah pada proses pengangkutannya.
c. Kurang optimal dalam meredam kebisingan maupun menjaga stabilitas suhu ruangan.

Untuk mendapatkan batako dengan mutu yang baik, salah satu faktor yang dapat mempengaruhi batako salah satunya yaitu faktor air semen (fas). Faktor air semen merupakan perbandingan dari berat air juga berat semen dalam suatu campuran (Anwar dkk., 2025). Dalam pembuatan suatu batako diperlukan perbandingan jumlah air yang ditentukan sebelum pembuatan.

2.1.1 Ukuran Batako

Ukuran dan jenis pada batako berbeda-beda sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan. Mengacu pada SNI 03-0348-1989, standarisasi untuk ukuran pada batako dapat disajikan seperti **Tabel 2.1** sebagai berikut.

Tabel 2.1 Ukuran batako berdasarkan SNI 03-0348-1989

Jenis Bata Beton Pejal	Ukuran (mm)		
	Panjang	Lebar	Tebal
Besar	400 ± 3	200 ± 3	100 ± 2
Sedang	300 ± 3	150 ± 3	100 ± 2
Kecil	200 ± 3	100 ± 2	80 ± 2

Sumber: SNI 03-0348-1989

2.1.2 Syarat Fisis

Dalam pembuatan batako harus memenuhi syarat fisis sesuai dengan standar ketentuan yang berlaku yaitu berdasarkan SNI 03-0348-1989 yang disajikan pada **Tabel 2.2** sebagai berikut.

Tabel 2.2 Syarat fisis batako berdasarkan SNI 03-0349-1989

No	Syarat Fisis	Satuan	Tingkat Mutu Bata Beton Pejal				Tingkat Mutu Bata Berlubang			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV
1.	Kuat tekan bruto* rata-rata min.	Kg/cm^2	100	70	40	25	70	50	35	20
2.	Kuat tekan bruto masing-masing benda uji min.	Kg/cm^2	90	65	35	21	65	45	30	17

No	Syarat Fisis	Satuan	Tingkat Mutu Bata Beton Pejal				Tingkat Mutu Bata Berlubang			
			I	II	III	IV	I	II	III	IV
3.	Penyerapan air rata-rata	%	25	35	-	-	25	35	-	-

Ket: *kuat tekan bruto yaitu beban tekan keseluruhan saat benda uji pecah, dibagi luas bata beton termasuk luas lubang dan lengkungan tepi.

Sumber: SNI 03-0349-1989

Berdasarkan **Tabel 2.2**, batako mempunyai empat tingkatan mutu dengan penggunaan yang berbeda. Menurut Sapulette dkk. (2024), berdasarkan persyaratan batako dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis mutu dari tingkatan I hingga IV sesuai dengan yang dijelaskan sebagai berikut.

a. Tingkat mutu I, yaitu batako dengan mutu tertinggi yang digunakan menahan beban pada kondisi tidak terlindungi oleh atap.
b. Tingkat mutu II, yaitu batako yang digunakan menahan beban pada kondisi terlindungi oleh atap.
c. Tingkat mutu III, yaitu batako yang tidak digunakan menahan beban dan penggunaannya di tempat yang tidak terpapar air hujan dan sinar matahari secara langsung seperti dinding partisi, penggunaannya diperbolehkan tidak diplester, dan terlindungi oleh atap.
d. Tingkat mutu IV, yaitu batako yang tidak digunakan menahan beban dan penggunaannya di tempat yang tidak terpapar air hujan dan sinar matahari secara langsung seperti dinding partisi, penggunaannya diharuskan diplester, dan terlindungi oleh atap.

2.2 Material Pembentuk Batako

2.2.1 Semen *Portland*

Secara subtansial, semen *portland* berbentuk serbuk yang bertindak menjadi agen pengikat hidrolik melalui mekanisme pengerasan yang dipicu oleh penambahan air. Semen *portland* difungsikan sebagai pengikat agregat untuk menjadi massa yang solid, pengikatan tersebut terjadi karena adanya proses hidrasi pada beton menggunakan air untuk pembentukan pasta semen (Zebua dkk., 2026). Mengacu

pada peraturan SNI 15-2049-2004, semen *portland* mempunyai kandungan udara dengan besaran tertentu yang terdapat pada mortar dengan syarat ketika dilakukan pengujian dengan suatu metode.

Pada pembuatan batako, semen *portland* yang dicampur dengan air akan membentuk pasta semen sehingga pasta semen tersebut dapat difungsikan sebagai bahan untuk pengikat agregat butiran menjadi satu-kesatuan padatan. Semen *portland* juga mampu mempercepat ataupun memperlambat proses pengeringan sesuai kebutuhan jika diperlukan menggunakan bahan tambah lain. Sesuai dengan peraturan yang tercantum di dalam SNI 15-2049-2004, semen *portland* dapat diklasifikasikan dalam beberapa golongan sesuai dengan jenis dan penggunaannya, sesuai dengan uraian sebagai berikut.

a. Golongan I

   Golongan semen *portland* yang digunakan secara umum tanpa adanya syarat tertentu seperti pada semen golongan lain.

b. Golongan II

   Golongan semen *portland* yang membutuhkan resistensi terhadap unsur sulfat maupun hidrasi panas yang sedang.

c. Golongan III

   Golongan semen *portland* yang membutuhkan kekuatan tinggi pada tahap awal setelah terjadi proses pengikatan.

d. Golongan IV

   Golongan semen *portland* yang membutuhkan panas hidrasi yang rendah.

e. Golongan V

   Golongan semen *portland* yang membutuhkan resistensi terhadap unsur sulfat.

2.2.2 Agregat Halus

Agregat halus sebagai bahan yang penting dalam campuran pembuatan batako dengan penggunaan yang memerlukan semen sebagai bahan pengikatnya. Kualitas agregat halus yang digunakan akan memengaruhi tingkat kemampuan agregat halus untuk mengisi celah dalam pembuatan batako. Hal itu mampu memengaruhi tingkat kepadatan dan kuat tekan batako yang dihasilkan.

Berdasarkan SNI 2847:2013 maupun pada ASTM C33-03, menjelaskan bahwa agregat halus sebagai komponen dalam campuran pembuatan batako difungsikan sebagai bahan pengisi dalam pembuatan mortar. Pemilihan dalam penggunaan agregat halus juga diperlukan perhatian agar menghasilkan batako dengan kualitas yang baik. Berdasarkan peraturan yang dituliskan SNI 2847:2013 maupun pada ASTM C33-03, memaparkan bahwa agregat halus merupakan kata lain pasir yang mempunyai ukuran bervariasi dengan butiran harus lebih kecil dari 4,75 mm atau mampu lolos pada saringan No.4 hingga No.100. Batasan gradasi telah diatur pada ketentuan ASTM C33-03 yang disajikan pada **Tabel 2.3** di bawah ini sebagai berikut.

Tabel 2.3 Batasan gradasi/butiran agregat halus

Ukuran Saringan	Persentase Lolos pada Setiap Saringan
9,5 mm (3/8 in)	100
4,76 mm (No.4)	95-100
2,36 mm (No.8)	80-100
1.19 mm (No.16)	50-85
0,595 mm (No.30)	25-60
0,3 mm (No.50)	10-30
0,15 mm (No.100)	0-10

Sumber: ASTM C33-03

Syarat-syarat yang harus diperhatikan saat menggunakan agregat halus dapat merujuk pada PBBI 1971 Bab III, pada 3.3 diantaranya yang berisi pernyataan sebagai berikut.

a. Agregat halus dapat berbentuk pasir alami yang berasal dari batuan alam yang terbentuk secara alami dan dapat berbentuk pasir buatan dari batuan yang dipecah menggunakan alat.
b. Agregat halus bersifat abadi atau tidak hancur karena dipengaruhi oleh cuaca, mempunyai karakteristik dengan butiran tajam serta keras.
c. Kadar lumpur yang terdapat di dalam agregat halus tidak melebihi 5% dari berat kering dengan kata lain agregat halus tidak dapat lolos pada saringan dengan diameter 0,063 mm. Jika kadar lumpur yang lolos saringan dengan diameter tersebut melebihi ketentuan yang ada, maka agregat halus harus melewati proses pencucian terlebih dahulu.

d. Agregat halus harus bebas terhadap bahan organik yang terlalu banyak, pengujiannya menggunakan metode warna atau dengan menggunakan larutan NaOH 3%.
e. Butiran agregat halus harus memenuhi standar saringan sebagai berikut.
    1) Lolos saringan diameter 4 mm dengan maksimal 98% dari berat.
    2) Lolos saringan diameter 1 mm dengan maksimal 90% dari berat.
    3) Lolos saringan diameter 0,25 mm di antara 5 hingga 20% dari berat.
f. Agregat halus yang berasal dari laut tidak diperkenankan untuk digunakan sebagai bahan pembuatan beton kecuali telah melalui pemeriksaan oleh lembaga tertentu.

2.2.3 Air

Dalam pembuatan batako, penggunaan air berfungsi sebagai komponen yang difungsikan dalam pencampuran antara semen *portland* dan agregat halus. Jumlah air yang dipakai sebagai campuran batako harus diperhitungkan karena proporsi air yang tepat penting untuk memastikan kekuatan dan kestabilan struktur yang dihasilkan. Pemakaian air bersih diperlukan untuk penyusunan benda uji dengan kualitas yang baik. Pemakaian air diatur pada SNI 2847:2019 dengan syarat dan ketentuan sebagai berikut.

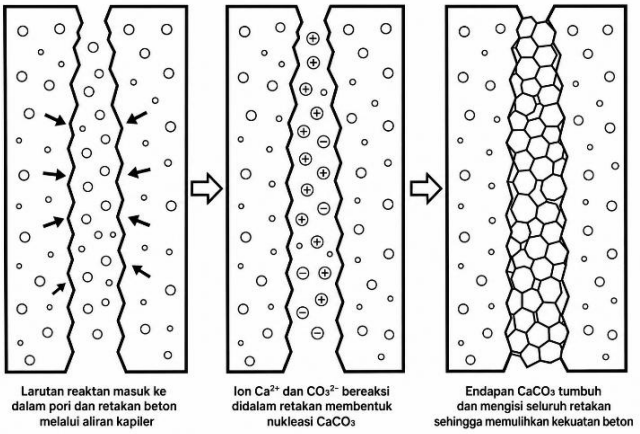
a. Tidak mengandung lumpur lebih dari 2 gr/liter
b. Kadar asam dan garam yang terkandung tidak lebih dari 15 liter
c. Kebutuhan air yang digunakan harus diukur dengan tepat dan sesuai dengan keperluan

2.3 Metode *Self-healing*

Self-healing merupakan kemampuan suatu material untuk memulihkan kerusakan internal, dalam artian fisik, emosional, kimia, biologis, maupun teknologi secara mandiri tanpa bantuan eksternal yang signifikan (Singh dkk., 2026). Sifat dalam penyembuhan mandiri ini berkontribusi pada peningkatan masa pemakaian struktur sekaligus meminimalisir kebutuhan akan perawatan rutin (Jose dkk., 2026). Berdasarkan sistem penyembuhannya, material berbasis semen dengan metode *self-*

healing memiliki dua cara yaitu autogenik dan otonom. Menurut Jaf (2023), perkembangan penyembuhan diri autogenik yaitu sifat yang dimiliki oleh semen dalam penutupan retak secara alami yang bersumber dari hidrasi semen yang berlanjutan. Sedangkan penyembuhan diri otonom memerlukan agen penyembuhan eksternal yang ditambahkan seperti bahan kimia, kapsul, atau mikroorganisme aktif yang difungsikan sebagai material pengisi retakan.

Dalam perkembangan *self-healing* secara metode yang digunakan dapat diklasifikan menggunakan dua metode, secara mikroenkapsulasi dan mikroorganisme. Menurut penelitian oleh (Reda & Chidiac, 2022), Metode kapsulasi pada semen *self-healing* berfungsi sebagai media penyimpan agen pemulihan yang akan dilepaskan saat dipicu secara mekanis. Cangkang kapsul dirancang dengan memiliki ketahanan tinggi untuk melindungi agen penyembuh selama proses pencampuran dan pengecoran, namun cangkang tersebut akan ikut pecah dan mengeluarkan agen pemulihan saat terjadi retakan pada struktur. Sementara itu, metode mikroorganisme memanfaatkan bakteri yang disisipkan ke dalam matriks semen. Sebaliknya menurut Javeed dkk. (2024), sistem penyembuhan berbasis mikroba memanfaatkan siklus hidup bakteri yang dapat beralih dari fase dorman (bakteri tertidur) ke aktif saat terpapar air dengan mengendapkan mineral kalsit di area yang rusak hingga memulihkan retakan. Setelah proses pemulihan selesai, bakteri kembali ke tahap hibernasi dan tetap siaga untuk bereaksi terhadap kerusakan di masa depan, menjadikannya agen penyembuh yang memiliki daya tahan jangka panjang. Spora bakteri, terutama genus *Bacillus sp.* Merupakan bakteri yang memiliki potensi dalam penerapan *self-healing* yang berkelanjutan, sehingga berpotensi mendukung peningkatan masa layanan material hingga mengurangi dampak pada lingkungan (Kandaswamy dkk., 2024). Mekanisme *self-healing* juga memungkinkan proses pemulihan retakan tanpa memerlukan perbaikan secara langsung oleh manusia, serta berkontribusi mempertahankan integritas struktur hingga masa pemakaian material (Kandaswamy dkk., 2024). Berikut ini pada **Gambar 2.1** akan disajikan gambaran mengenai proses terjadinya *self-healing* pada batako untuk menutup retakan.



Gambar 2.1 Skema *self-healing*
Sumber: Diadopsi dari (Elgendy dkk., 2025)

Pada material yang menggunakan semen, sistem kerja *self-healing* terjadi dengan adanya pembentukan agen penyembuh yang mengisi rongga retakan dengan demikian mikrostruktur material dapat dipulihkan dengan berkelanjutan. Hal ini merujuk pada kemampuan agen pemulihan yang dimasukkan ke dalam batako. Sistem kerja dalam meningkatkan ketahanan dalam memulihkan retak dengan memperbaiki mikrostruktur material dapat dicapai dengan meminimalkan penyerapan air, permeabilitas, dan proses difusi (Bandlamudi dkk., 2023). Faktor-faktor yang memengaruhi proses tersebut meliputi kandungan karbon anorganik terlarut dan ion kalsium dalam larutan pori, ketersediaan situs nukleasi untuk pembentukan kristal, salinitas, serta suhu suspensi (Bandlamudi dkk., 2023).

2.3.1 Mikroenkapsulasi

Mikroenkapsulasi merupakan salah satu pendekatan otonom *self-healing* material berbasis semen dengan menambahkan bahan penyembuh di dalam mikrokapsul, kemudian dilepaskan ketika material mengalami retak (Liu dkk., 2023). Pada sistem *self-healing* berbasis kapsul, bahan penyembuh ditempatkan di dalam kapsul dan dilindungi oleh material cangkang, yang berfungsi memperbaiki bila terjadi kerusakan dan memungkinkan pelepasan selama terjadi retak (Papaioannou dkk., 2021). Papaioannou dkk. (2021) mengelompokkan sistem enkapsulasi ke dalam jenis mikrokapsul dengan ukuran hingga 1 mm dan makrokapsul dengan ukuran

lebih besar dari 1 mm atau berbentuk tabung dengan panjang sampai 100 mm. Dalam sistem mikroenkapsulasi, cangkang harus melindungi bahan penyembuh dari lingkungan yang bersifat alkalis dan gaya mekanis selama proses pencampuran, tetapi bahan tersebut juga harus mampu pecah jika terjadi retakan yang merambat melewati kapsul (Reda & Chidiac, 2022). Oleh karena itu, keberhasilan dalam metode ini tidak hanya memperhatikan bahan penyembuh yang mampu memperbaiki retakan tapi juga mempertimbangkan pencapaian kapsul dalam melepaskan bahan penyembuh (Reda & Chidiac, 2022).

Mikroenkapsulasi tidak hanya digunakan untuk menyimpan bahan kimia, tetapi juga dapat dikembangkan sebagai sistem pembawa bakteri dalam mikrokapsul dengan melibatkan sistem enkapsulasi (Adresi & Khoshoo, 2025). Pada sistem tersebut, kapsul berfungsi melindungi bakteri dari lingkungan beton yang bersifat basa serta mengatur pelepasannya ketika terjadi kerusakan material (Adresi & Khoshoo, 2025). Dengan adanya kapsul tersebut difungsikan sebagai sistem pengantar bagi mikroorganisme agar terlindungi dari kondisi ekstrem pada material semen, sedangkan pembentukan mineral tetap dilakukan oleh bakteri secara biologis yang menghasilkan produk penyembuhan retakan.

Prinsip kerja mikroenkapsulasi didasarkan pada mekanisme pelepasan bahan inti setelah kapsul mengalami reaksi. Pada mekanisme *mechanical fracture trigger*, ketika terjadi retak pada material, cangkang mikroenkapsulasi mengalami tegangan dan pecah sehingga bahan penyembuh dalam kapsul dilepaskan, kemudian menuju lokasi retak untuk menutup retakan (Liu dkk., 2023). Pemilihan bahan inti dan cangkang harus tepat karena bahan tersebut harus mampu menghasilkan produk yang dapat menutup retakan setelah dilepaskan dari kapsul. Sidiq dkk. (2020) menggunakan natrium silikat sebagai bahan penyembuh yang dimasukkan selubung berbasis poliuretan, sedangkan Du dkk. (2019) mengembangkan mikroenkapsulasi dengan *Toluene-Di-Isocyanate* (TDI) sebagai inti dan parafin sebagai cangkang.

Metode pembuatan mikroenkapsulasi dapat dilakukan melalui beberapa cara, tapi terdapat metode yang sering digunakan dalam mengaplikasikannya. Metode tersebut meliputi *interfacial polymerization*, *in situ polymerization*, *spray drying*,

dan *melt condensation* (Liu dkk., 2023). Liu dkk. (2023) misalnya, menghasilkan mikroenkapsulasi dengan metode *complex coacervation* menggunakan *styrene maleic anhydride* sebagai bahan dinding dan resin epoksi sebagai bahan inti untuk menghasilkan sistem yang dapat dipicu secara mekanis ketika terjadi retak pada material semen. Penelitian lain menggunakan metode *melt–dispersion–condensation* untuk menghasilkan mikroenkapsulasi dengan *microcrystalline wax* sebagai cangkang dan resin epoksi E-51 sebagai bahan inti penyembuh. Perbedaan metode pembuatan tersebut berpengaruh terhadap ukuran kapsul, ketebalan dinding, kapasitas bahan inti, kestabilan kapsul, dan kemampuan kapsul untuk bertahan selama proses pencampuran (Liu dkk., 2023).

Sejalan dengan pengembangan tersebut, penggunaan bahan penyembuhan yang dienkapsulasi semakin mendapat perhatian dari akademisi dan industry karena sistemnya mampu mempertahankan inti di dalam cangkang hingga terjadi retak pada material (Papaioannou dkk., 2021). Tetapi disamping itu terdapat permasalahan yang harus diperhatikan dalam menggunakan metode ini. Terdapat beberapa bahan kimia yang bisa digunakan salah satunya ialah *calcium sulfoaluminate* yang memiliki beberapa keterbatasan yaitu kualitas ikatan antarmuka kapsul dengan matriks semen tidak selalu optimal, proses pembuatan cangkang kapsul yang kompleks, serta potensi penurunan sifat mekanik beton akibat ketidakseragaman bentuk matriks sehingga meningkatkan jumlah *void* ketika kadar kapsul digunakan dalam jumlah besar (Adhikary dkk., 2024). Metode mikroenkapsulasi juga memiliki keterbatasan dalam ketahanan agen penyembuhan saat proses pencampuran dalam adukan, memiliki efektivitas yang rendah pada retakan yang berukuran kurang dari 50 μm, memiliki keterbatasan jumlah agen penyembuhan yang dapat dienkapsulasi dalam skala besar, dan terdapat tantangan terhadap pencapaian keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas material (Naqvi & Raza, 2025). Terdapat pula penggunaan mikroenkapsulasi dengan menggunakan cangkang polimer mempunyai tantangan yaitu membutuhkan biaya produksi yang cukup tinggi serta masa penyimpanan terbatas pada resin polimerik (Naqvi & Raza, 2025).

2.3.2 *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP)

Metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) termasuk ke dalam salah satu pendekatan *self-healing* tipe otonom dengan mengandalkan proses aktivitas metabolisme bakteri yang memicu pembentukan endapan kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang berfungsi sebagai material pengisi untuk memulihkan kerusakan pada material berbasis semen (Bagga dkk., 2022). Reaksi *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) merupakan proses yang berperan penting dalam mengkatalisis hidrolisis urea yang dilakukan oleh berbagai mikroorganisme yang memiliki kemampuan menghasilkan urease dalam konsentrasi tinggi (Anbu dkk., 2016).

Bakteri dari genus *Bacillus* banyak diaplikasikan sebagai komponen biologis dalam agen *self-healing* karena kemampuannya menghasilkan enzim urease yang berperan dalam hidrolisis urea dan memicu presipitasi $CaCO_3$ (Elgendy dkk., 2025). Dalam proses *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), urea bertindak sebagai substrat yang memasok ion karbonat dan ammonia karena hidrolisis urea, sedangkan ion Ca^{2+} yang berasal dari kalsium klorida yang bereaksi dengan CO_3^{2-} sehingga memicu presipitasi kalsium karbonat di permukaan sel bakteri pada Ph netral (Wong dkk., 2024). Reaksi antara ion karbonat hasil hidrolisis urea dengan ion kalsium yang berasal dari kalsium klorida memicu membentuk endapan $CaCO_3$ yang selanjutnya menyebabkan dapat menutup retakan yang terjadi (Wong dkk., 2024). Perubahan bentuk menjadi kristal berkaitan dengan aktivitas dari metabolisme dari bakteri serta keberadaan bahan organik sehingga material yang diberikan bakteri akan terbentuk lapisan kristal $CaCO_3$ pada permukaannya dan merubah karakteristik dari mikrostrukturnya (Bandlamudi dkk., 2023). Amjad dkk. (2023a) menerapkan larutan spora *Bacillus subtilis* secara langsung ke dalam campuran beton sebagai pengganti air pencampur. Dalam pengisian retakan, $CaCO_3$ efektif melakukan penutupan dengan rentang ukuran dari 0,1 mm hingga 0,3 mm (Wong dkk., 2024).

Umumnya, reaksi biokimia pada metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) berlangsung melewati beberapa tahapan yang dijelaskan oleh Zulfikar dkk. (2021) berikut.

1) Tahap 1 — Hidrolisis urea oleh enzim urease

$CO(NH_2)_2 + H_2O \xrightarrow{\text{urease}} 2NH_4^+ + CO_3^{2-}$ ..... (2.1)

Pada tahap pertama, urea ($CO(NH_2)_2$) mengalami hidrolisis dengan bantuan enzim urease yang berasal dari mikroorganisme/bakteri lalu urea diubah menjadi ion amonium (NH_4^+) dan ion karbonat (CO_3^{2-}). Fungsi dari urease ialah mempercepat pemecahan urea sehingga ion karbonat yang akan diperlukan untuk pembentukan kalsium karbonat.

2) Tahap 2 — $CaCl_2$ terdisosiasi menghasilkan Ca^{2+}

$CaCl_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2Cl^-$ ..... (2.2)

Kalsium klorida ($CaCl_2$) yang dimasukkan ke dalam larutan media kultur akan terdisosiasi menjadi ion kalsium (Ca^{2+}) dan ion klorida ($2Cl^-$). Fungsi dari kalsium klorida dalam sistem ini ialah sebagai sumber pembentukan ion kalsium. Yang mana ion kalsium diperlukan dalam pembentukan mineral.

3) Tahap 3 — Ca^{2+} bereaksi dengan CO_3^{2-}

$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$ ..... (2.3)

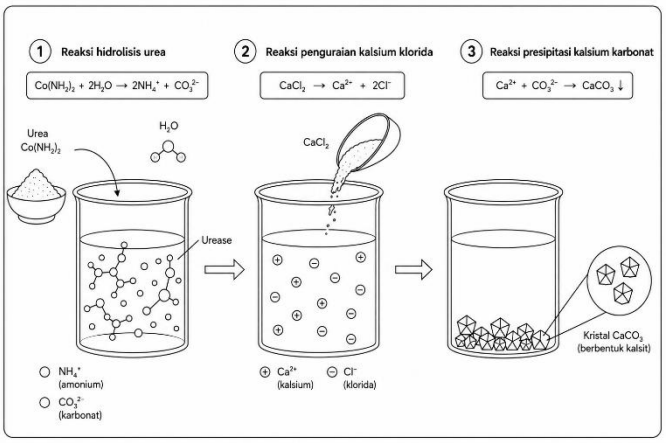
Hasil ion karbonat (CO_3^{2-}) dari urea pada tahap 1 dan ion kalsium (Ca^{2+}) dari kalsium klorida pada tahap 2 akan digabungkan sehingga membentuk kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang nantinya akan mengendap sebagai mineral atau kalsit. Kalsit merupakan bentuk kristal alami dari senyawa kalsium karbonat.

4) Tahap 4 — Ion NH_4^+ dan Cl^- membentuk NH_4Cl

$2NH_4^+ + 2Cl^- \rightarrow NH_4Cl$ ..... (2.4)

Ion yang tersisa dari reaksi sebelumnya kemudian dapat membentuk ammonium klorida (NH_4Cl) sebagai produk samping dari reaksi ureolisis yang tidak berperan langsung dalam penutupan retakan.

Dari tahapan di atas akan disajikan gambaran mengenai proses terjadinya *self-healing* dengan menggunakan metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) pada **Gambar 2.2** berikut.



Gambar 2.2 Skema metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP)
Sumber: Diadopsi dari penjelasan (Zulfikar dkk., 2021)

Dalam metode *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP), penambahan urea yang dihidrolisis oleh enzim urease pada bakteri akan membentuk ion karbonat sedangkan kalsium klorida akan menghasilkan ion kalsium yang dibutuhkan dalam pembentukan kalsium karbonat. Proses hidrolisis urea juga berfungsi meningkatkan alkalinitas dalam larutan, sedangkan penambahan larutan penyangga dapat digunakan untuk mengendalikan perubahan Ph yang terjadi (Omoregie dkk., 2021). Urea berperan sebagai reaktan utama dalam proses MICP (Arias dkk., 2025). Disamping itu, penambahan kalsium klorida menjadi sumber ion kalsium pada proses MICP yang efektif serta mampu meningkatkan aktivitas urease (Elgendy dkk., 2025). Elgendy dkk. (2025) juga menyebutkan bahwa penggunaan kalsium klorida sebagai pemasok ion kalsium berperan dalam pembentukan endapan kalsium karbonat dalam bentuk kristal rombohedral (kalsit). Pengisian kristal tersebut dapat menurunkan jalur aliran air dan meningkatkan kerapatan lokal material sehingga manfaat MICP tidak hanya berkaitan dengan sifat fisik pada material, tapi juga berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap masuknya fluida serta beberapa sifat mekanik material (Bakr dkk., 2023).

Konsentrasi bakteri merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi keberhasilan proses *self-healing* berbasis MICP. Dalam sistem berbasis urea dan sumber kalsium, kepadatan sel bakteri juga perlu menjadi pertimbangan dalam keberhasilan metode *self-healing.* Kepadatan sel bakteri umumnya berkisar 10^6 hingga 10^8 sel/Ml agar proses biomineralisasi berjalan optimal, sekaligus

memastikan bakteri tetap bertahan hidup di dalam lingkungan beton yang memiliki sifat basa (Gul & Shaheen, 2026).

2.4 Media Kultur Bakteri *Bacillus Subtilis*

Untuk mendapatkan bakteri yang mampu hidup maka diperlukan lingkungan yang sesuai agar bakteri dapat berkembang biak secara optimal. Sehingga untuk memenuhi kebutuhan tersebut diperlukan adanya media kultur bakteri. Media kultur merupakan campuran nutrisi yang dirancang untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangbiakan mikroorganisme, kandungan nutrisi untuk organisme tumbuh disebut medium dan proses pertumbuhan mikroorganisme dinamakan kultur (Atmanto dkk., 2022). Dalam pengembangbiakan mikroorganisme sangat diperlukan adanya nitrogen dan karbon untuk mendukung nutrisinya. Mikroorganisme memerlukan sumber nitrogen untuk pembentukan biomolekul esensial seperti asam nukleat dan protein, sedangkan sumber karbon berperan sebagai penyedia energi untuk mendukung aktivitas metabolisme mikroba (Wang dkk., 2025). Selain itu, bakteri dan jamur juga memerlukan makronutrien dan mikroelemen untuk menunjang proses metabolisme dan pertumbuhan sel (Izebe dkk., 2020).

Izebe dkk. (2020) melakukan penelitian mengenai penggunaan sorgum untuk alternatif dari *nutrient broth* pada kultur bakteri *Bacillus subtilis*, pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa media sorgum mampu mendukung pertumbuhan *Bacillus subtilis* dengan pola pertumbuhan yang hampir sama dengan *nutrient broth* sehingga berpotensi menjadi media alternatif kultur bakteri. Salah satu bahan pertanian lain yang berpotensi digunakan sebagai media alternatif kultur *Bacillus subtilis* yaitu jagung karena kandungan yang dibutuhkan oleh bakteri mirip dengan sorgum. Berikut ini akan ditampilkan **Tabel 2.4** mengenai kandungan yang ada pada sorgum dan **Tabel 2.5** mengenai kandungan jagung sebagai media pengganti *nutrient broth*.

Tabel 2.4 Komposisi nutrisi dari biji sorgum

Fraksi Biji	% Berat Biji	Protein (%)	Abu (%)	Minyak (%)	Pati (%)
Biji Utuh	100,0	12,30	1,67	3,60	73,80
Endosperma	82,30	12,30	0,37	0,60	82,50

Sumber: (Izebe dkk., 2020)

Tabel 2.5 Komposisi nutrisi dari biji jagung

Jenis Jagung	Kelembapan	Abu	Protein	Karbohidrat/Pati
Crystalline/Mutiara	10,5	1,7	10,3	70,3
Starchy	11,2	2,9	9,1	72,8
Sweet/Jagung Manis	9,5	1,5	12,9	69,3

Sumber: (Food and Agriculture Organization, Gross Chemical Composition)

Dari **Tabel 2.4** dan **Tabel 2.5** menunjukkan bahwa protein dan karbohidrat yang diperlukan untuk pembuatan media kultur menunjukkan rentang nilai yang hampir sama dengan sorgum. Di samping kandungan nutrisinya, jagung juga mudah diperoleh di Indonesia sehingga berpotensi menjadi media kultur yang lebih ekonomis dibandingkan media komersial.

2.5 Analisis Retakan Berbasis Perangkat Lunak

ImageJ adalah distribusi perangkat lunak untuk menganalisis citra sumber terbuka yang dapat digunakan untuk menghitung luas retakan menjadi data kuantitatif berdasarkan jumlah dan distribusi piksel yang teridentifikasi sebagai retakan (Ahmad dkk., 2025; Patzelt dkk., 2022). Perkembangan dari *ImageJ* yaitu merepresentasikan objek sebagai susunan piksel dengan nilai intensitas tertentu terhadap pola retakan pada permukaan benda uji (Szeląg, 2020). Dalam analisis citra, faktor skala yang digunakan untuk menghubungkan ukuran piksel yang ditampilkan pada analisis citra akan dikonversikan kedalam ukuran yang sebenarnya, sehingga karakteristik retakan dapat dinyatakan dalam satuan geometris. Seperti pernyataaan (Patzelt dkk., 2022), menggunakan faktor skala 883,64 nm/piksel pada citra hasil pengamatan dan menyatakan densitas retakan tersebut dalam satuan m/m^2. Benda uji yang telah didokumentasikan akan dianalisis menggunakan perangkat lunak *ImageJ* untuk mendapatkan luasan dalam penutupan retakan dengan cara membuat gambar mentah menjadi gambar dengan skala 8-bit,

penyesuaian skala, penyesuain ambang, dan menghilangkan piksel tanpa memerlukan fungsi *binary-erode* (Ahmad dkk., 2025).

Analisis berbasis citra memiliki kelebihan dalam mendeteksi sebuah retakan karena teknik pemrosesan citra dapat memberikan hasil pengukuran yang lebih akurat dan terukur dibandingkan dengan metode deteksi menual (konvensional) (Mohan & Poobal, 2018). Aplikasi dalam mendeteksi retakan secara otomatis ditingkatkan dalam menganalisis kerusakan permukaan secara cepat dan dapat dipercaya, sebagai metode alternatif dalam peninjauan manusia secara tradisional yang mana lebih lambat dan tidak objektif (Mohan & Poobal, 2018). Foto permukaan retak sebelum dan sesudah proses penyembuhan dianalisis menggunakan *ImageJ* untuk mengukur perubahan luas retakan, kemudian efisiensi *self-healing* ditentukan berdasarkan rata-rata penurunan retakan (Ahmad dkk., 2025). Dengan demikian, hasil pengamatan visual dapat dilengkapi dengan nilai numerik yang dibandingkan antarumur dan antarvariasi benda uji.

2.6 Pengujian Mekanis

2.6.1 Daya Serap

Daya serap air merupakan kemampuan material berbasis semen dalam menyerap dan menahan air yang masuk ke dalam pori pori maupun jaringan kapiler material (Kabir & Garg, 2023). Pada pengujian bahan berbasis semen, daya serap umumnya dinyatakan berdasarkan pertambahan masa air yang diserap oleh benda uji dibandingkan dengan massa kering benda uji. Misalnya pada penelitian oleh Yamasamit dkk. (2023), penelitian tersebut secara matematis menentukan daya serap air berdasarkan perubahan massa benda uji setelah perendaman terhadap massa benda uji dalam kondisi kering.

Pengujian daya serap sebelum benda mengalami retak dilakukan untuk memperoleh nilai awal kemampuan material dalam menyerap air pada kondisi terbaiknya. Durga dkk. (2023) melaporkan bahwa benda uji beton pada kondisi *uncracked* yang mengandung *Bacillus subtilis* dengan konsentrasi (10^8) menunjukkan nilai daya serap sebesar 4,87%**,** sedangkan nilai pada beton referensi sebesar 4,91%. Data tersebut menunjukkan bahwa nilai daya serap pada kondisi

utuh dapat digunakan sebagai nilai acuan awal untuk menilai perubahan daya serap ketika benda uji mengalami retak dan menjalani proses *self-healing.*

Pada benda uji yang mengalami retak dapat meningkatkan jalur masuk air dan menyebabkan peningkatan permeabilitas material. Sehingga pengujian daya serap dapat digunakan dalam mengevaluasi perubahan karakteristik masuknya air sebelum dan sesudah proses *self-healing.* Misalnya penelitian yang dilakukan oleh Durga dkk. (2023), secara langsung menunjukkan bahwa daya serap beton mengalami peningkatan setelah benda uji mengalami retak, sehingga pengujian daya serap dapat digunakan untuk mengamati perubahan karakteristik masuknya air akibat terbentuknya retakan. Dalam penelitian yang sama, setelah benda uji mengalami cracking, nilai daya serap meningkat menjadi 8,54% pada beton dengan *Bacillus subtilis* (10^8), kemudian menurun menjadi 5,69% setelah proses *healing* dalam kalsium laktat (Durga dkk., 2023). Dengan demikian, nilai daya serap sebelum retak dapat digunakan sebagai kondisi awal atau acuan, sedangkan perubahan nilai benda uji yang telah diretakkan dan melalui tahap *self-healing* dapat digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik penyerapan air akibat retak serta tingkat pemulihannya setelah proses MICP berlangsung.

2.6.2 Kuat Tekan

Kuat tekan yaitu parameter mekanis yang menunjukkan kemampuan benda uji dalam menerima beban tekanan maksimum hingga mencapai nilai keruntuhan terhadap penampang (Aulia dkk., 2020). Kuat tekan dilakukan dengan alat *compression test*. Pengujian kuat tekan perlu dilakukan untuk mengetahui suatu kualitas, kapasitas mekanis, dan konsistensi benda uji, serta banyak digunakan dalam pengendalian mutu material konstruksi. Pada material berbasis semen yang dimasukkan suatu bakteri, perubahan kuat tekan juga digunakan untuk menilai apakah penambahan agen biologis memberikan pengaruh terhadap sifat mekanis material sebelum dan setelah mengalami kerusakan (Khushnood dkk., 2020).

Pada kuat tekan benda uji tanpa diretakkan digunakan sebagai salah satu parameter pembanding dengan benda uji kontrol (Zaerkabeh dkk., 2022). Zaerkabeh dkk. (2022) juga menjelaskan bahwa nilai-nilai dari benda uji tanpa

diretakkan akan menjadi dasar pembanding dengan benda uji yang mengalami *pre-cracking* untuk mengevaluasi tingkat pemulihan sifat mekanis setelah proses *self-healing* berlangsung. Pengujian kuat tekan pada benda uji utuh diperlukan karena peningkatan kuat tekan akibat perubahan mikrostruktur material sejak awal percetakkan tidak dapat disamakan dengan pemulihan kuat tekan setelah material mengalami retak.

Pada benda uji yang telah diretakkan, pengujian kuat tekan dilakukan setelah benda uji diberikan periode pemulihan tertentu untuk mengetahui kemampuan material dalam memperoleh kembali kapasitas mekanisnya setelah proses *self-healing* (Zaerkabeh dkk., 2022). Hasil dari pengujian kuat tekan tersebut akan dibandingkan dengan kuat tekan benda uji utuh untuk menilai tingkat kapasitas mekanis yang dapat dipertahankan setelah proses penutupan retak.

2.7 Penelitian Terdahulu

Pada **Tabel 2.6** berikut ini akan dijabarkan mengenai penelitian terdahulu yang dijadikan acuan dalam melakukan penelitian yang akan disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.6 Penelitian terdahulu

No	Nama Author	Pengujian	Persentase Material	Durasi	Kuat Tekan	Daya Serap	Pemulihan Retakan
1	(Joshi dkk., 2018)	Kuat tekan	Substitusi air 0%, 2,5%, 5%, dan 10%.	28 hari	Kuat tekan terbesar terletak pada variasi 5% pada umur 28 hari yaitu 36,53 N/mm^2 yang dibandingkan dengan variasi 0% dengan kuat tekan 31,2 N/mm^2.	-	-
2	(Nguyen dkk., 2019)	Pemulihan retakan.	Penambahan *Bacillus subtilis* sebesar 1,82 x 10^{10} sel/cm^3.	23 dan 44 hari	-	-	Pemulihan retakan pada 23 hari tertutup sekitar 60% dan 44 hari tertutup 100%.
3	(Mahmood dkk., 2022)	Pemulihan retakan, kuat tekan, dan daya serap.	Penambahan *Baciluus subtilis* sebesar 2,8 x 10^3 sel/ml, 2,8 x	28 hari	Kuat tekan terbesar pada variasi 10^9 sel/ml yaitu 24,74 Mpa hasil ini meningkat sebesar 25,9% dibandingkan	Daya serap variasi 10^9 sel/ml menunjukan penyerapan air	Pemulihan retakan pada Variasi 10^3, 10^6, dan 10^9 dengan retak sebesar 0,6

No	Nama Author	Pengujian	Persentase Material	Durasi	Kuat Tekan	Daya Serap	Pemulihan Retakan
			10^6 sel/ml, dan 2,8 x 10^9 sel/ml.		dengan variasi kontrol dengan kuat tekan 19,64 Mpa.	68% lebih rendah dibanding variasi kontrol.	mm dapat pulih sepenuhnya, sedangkan pemulihan retakan tertinggi pada variasi 10^9 dengan retakan sebesar 1,71 mm.
4	(Islam & Waseem, 2023)	Pemulihan retakan, kuat tekan, dan daya serap.	Substitusi semen 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5%.	28 hari	a. Kuat tekan beton bakteri terbesar pada variasi 1% sebesar 31,12 Mpa dibandingkan dengan variasi 0% dengan kuat tekan 26,2 Mpa. b. Pemulihan kuat tekan terbesar pada variasi 1% sebesar 42,11 Mpa dibandingkan dengan variasi 0% dengan kuat tekan 26,2 Mpa.	Penyerapan air terendah pada beton bakteri umur 28 hari.	Beton bakteri tidak terdapat retak pada umur 28 hari.
5	(Amjad dkk., 2023)	Pemulihan retakan, kuat tekan,	Penambahan *B. Subtilis* sebesar 6 x 10^8 sel/cm^3.	3, 14, dan 28 hari	Kuat tekan beton bakteri meningkat 8,14% dibanding beton normal	Beton bakteri memiliki *sorptivity*	Beton bakteri menutup retakan sebesar 0,37 mm

No	Nama Author	Pengujian	Persentase Material	Durasi	Kuat Tekan	Daya Serap	Pemulihan Retakan
		dan daya serap.			dengan kuat tekan 27,65 Mpa pada umur 28 hari.	*coefficient* sekitar 0,092 mm/$\sqrt{min.}$	pada umur 28 hari.
6	(Yamasamit dkk., 2023)	Pemulihan retakan, kuat tekan, dan daya serap.	Spora *Bacillus subtilis* 10^8 CFU/ml.	7, 14, dan 28 hari	Kuat tekan terbesar pada variasi 10^8 CFU/ml yaitu 49,1 Mpa hasil ini meningkat sebesar 8,9% dibandingkan dengan mortar normal dengan kuat tekan 45,1 Mpa.	Daya serap variasi 10^8 CFU/ml menunjukan penyerapan air lebih rendah yaitu 2,1% dibanding mortar normal yaitu 3,5%.	Pemulihan retakan tertinggi yaitu 77% terjadi pada retakan dengan lebar 0,3 mm.
7	(Zamba & Mohammed, 2024)	Pemulihan retakan, kuat tekan, dan daya serap.	Pemanbahan *Bacillus subtilis* sebanyak 2% dari jumlah semen dengan konsentrasi bakteri 10^8 sel/ml.	7, 14, dan 28 hari	Kuat tekan beton bakteri terbesar pada umur 28 hari yaitu 32,88 Mpa yang dibandingkan dengan beton normal dengan kuat tekan 27,51 Mpa. Sedangkan pada beton yang diretakkan kuat tekan beton bakteri sebesar 32,09 Mpa dibandingkan beton normal 25,31 Mpa.	Penyerapan air pada beton bakteri berkurang hingga 59,98% dibandingkan dengan beton normal.	*Self-healing* indeks tercepat pada hari ke-28 oleh beton bakteri.

No	Nama Author	Pengujian	Persentase Material	Durasi	Kuat Tekan	Daya Serap	Pemulihan Retakan
8	(Ibrahim dkk., 2025)	Kuat tekan dan kuat lentur.	Penambahan *B. Subtilis* sebanyak 5% dan 10% pada mortar semen.	7, 28, dan 56 hari	Pada hari ke-28 kuat tekan variasi 5% meningkat sebesar 15% dan variasi 10% meningkat sebesar 8% dibandingkan mortar kontrol, sedangkan pada hari ke-56 variasi 5% meningkat sebesar 15% dan variasi 10% meningkat sebesar 10% dibandingkan mortal kontrol.	-	Menunjukan endapan $CaCO_3$ pada bagian mikroretak.
9	(Vishal dkk., 2025)	Pemulihan retakan, kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur.	Penambahan *Bacillus subtilis* sebesar10^5 dan 10^6 sel/ml.	3, 7, dan 28 hari	Kekuatan variasi 10% meningkat 25%-40% dibandingkan beton konvensional.	-	Beton dapat menutup retakan sebesar 91%-92% pada hari ke-7.
10	(Gul & Shaheen, 2026)	Pemulihan retakan, dan kuat tekan.	Penambahan *Bacillus Subtilis* sebesar 1,9 x 10^7 sel/cm^3 dengan substitusi air 0%, 5%, dan 10%.	14, 28, dan 56 hari	Kuat tekan terbesar pada umur 56 hari yaitu 32,2 Mpa pada variasi 10% yang dibandingkan dengan variasi 0% dengan kuat tekan 22,3 Mpa.	-	Lapisan penutup retak mulai terlihat setelah 24 jam.

No	Nama Author	Pengujian	Persentase Material	Durasi	Kuat Tekan	Daya Serap	Pemulihan Retakan
11	(Aliyu dkk., 2026)	Kuat tekan, daya serap air	Penambahan *Bacillus Subtilis* dengan substitusi air sebesar 0%, 5%, dan 10%.	7, 14, dan 28 hari	Kuat tekan terbesar diperoleh pada variasi 5% *Bacillus Subtilis* pada umur 28 hari, dengan peningkatan hingga 81% dibandingkan kontrol. Pada variasi 10%, kuat tekan mengalami sedikit penurunan dibandingkan variasi 5%.	Daya serap terendah diperoleh pada variasi 5% B. Subtilis, yaitu sekitar 7%, sedangkan kontrol sekitar 12%.	-

Berdasarkan penelitian terdahulu pada **Tabel 2.6**, penggunaan bakteri *Bacillus subtilis* melalui mekanisme *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) menunjukkan pengaruh terhadap kuat tekan material berbasis semen. Gul & Shaheen (2026) memperoleh kuat tekan tertinggi sebesar 32,2 MPa pada substitusi air 10%, dibandingkan dengan 22,3 MPa pada variasi 0%. Joshi dkk. (2018) memperoleh kuat tekan tertinggi sebesar 36,53 MPa pada substitusi air 5%, sedangkan pada kadar 10% kuat tekan menurun menjadi 26,52 MPa. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa penambahan kadar bakteri tidak selalu menghasilkan peningkatan kuat tekan secara linier dan setiap campuran memiliki kadar optimum yang berbeda.

Perbedaan hasil tersebut juga berkaitan dengan metode dan persentase substitusi yang digunakan. Gul & Shaheen (2026) dan Joshi dkk. (2018) menggunakan substitusi air, sedangkan Islam & Waseem (2023) dan Zamba & Mohammed (2024) menggunakan bakteri sebagai substitusi semen. Konsentrasi bakteri yang digunakan juga bervariasi dalam penelitian yang dilakukan oleh (Amjad dkk., 2023; Mahmood dkk., 2022; Nguyen dkk., 2019; Vishal dkk., 2025; dan Yamasamit dkk., 2023). Gul & Shaheen (2026) menjelaskan bahwa rentang konsentrasi efektif *Bacillus subtilis* untuk mendukung biomineralisasi berada pada 10^6-10^8 sel/mL. Angka 10^6 sel/mL merupakan batas bawah rentang tersebut, sedangkan 10^8 sel/mL merupakan batas atas yang masih termasuk dalam rentang efektif. Hasil Zamba & Mohammed (2024) memperkuat pemilihan batas atas tersebut karena konsentrasi 10^8 sel/mL meningkatkan kuat tekan beton dari 27,51 MPa menjadi 32,88 MPa dan penyerapan air pada beton bakteri berkurang hingga 59,98%. Dengan demikian, 10^8 sel/mL dipilih sebagai konsentrasi yang paling relevan untuk penelitian ini, bukan sebagai konsentrasi paling efektif secara universal. Konsentrasi di atas 10^8 sel/mL tidak dapat langsung dianggap lebih efektif karena penelitian terdahulu menggunakan objek dan metode yang berbeda. Konsentrasi 10^8 sel/mL selanjutnya dibuat tetap agar perubahan kinerja dapat dianalisis sebagai pengaruh persentase substitusi, bukan akibat perbedaan jumlah sel bakteri.

Ditinjau dari objek penelitian, kajian sebelumnya masih didominasi oleh beton dan mortar. (Amjad dkk., 2023; Gul & Shaheen, 2026; Islam & Waseem, 2023; Joshi dkk., 2018; Nguyen dkk., 2019; Vishal dkk., 2025; serta Zamba & Mohammed, 2024) menggunakan benda uji beton, sedangkan Ibrahim dkk. (2025) dan Yamasamit dkk. (2023) menggunakan mortar. Hasil dari beton dan mortar belum dapat langsung mewakili kinerja batako karena terdapat perbedaan bentuk produk, perbandingan bahan penyusun, serta persyaratan mutu. Dengan demikian, terdapat kesenjangan pada objek penelitian berupa kajian lebih lanjut mengenai penerapan *Bacillus subtilis* pada batako sebagai bata beton pejal yang dinilai berdasarkan persyaratan SNI 03-0348-1989.

Kesenjangan juga terlihat pada parameter kuat tekan dan daya serap. Amjad dkk. (2023) melaporkan peningkatan kuat tekan beton bakteri sebesar 8,14% dan nilai *sorptivity coefficient* sekitar 0,092 mm/√min. Zamba dkk. (2023) memperoleh kuat tekan mortar bakteri sebesar 27,67 MPa, lebih tinggi daripada mortar normal sebesar 23,5 MPa, serta penyerapan air sebesar 8,62%, lebih rendah daripada mortar normal sebesar 11,85%. Islam & Waseem (2023) juga menunjukkan bahwa variasi bakteri tertentu menghasilkan kuat tekan tertinggi dan penyerapan air terendah. Namun, hasil-hasil tersebut diperoleh pada beton atau mortar dengan dasar penambahan bakteri yang berbeda, sehingga hubungan antara persentase substitusi air, kuat tekan, dan daya serap pada batako masih belum dapat dijelaskan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini dirancang untuk menguji penggunaan *Bacillus subtilis* pada batako dengan konsentrasi bakteri tetap sebesar 10^8 sel/mL sebagai substitusi sebagian air pada variasi 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dengan menilai kuat tekan dan daya serap air, kemudian hasilnya dibandingkan dengan persyaratan batako tingkat mutu I berdasarkan SNI 03-0348-1989. Keterbaharuan penelitian ini terletak pada penerapan variasi substitusi kultur *Bacillus subtilis* yang terstruktur pada objek batako serta analisis keterkaitan antara kadar substitusi, kuat tekan, dan daya serap, serta ditinjau sifat bakteri tersebut dalam pemulihan retakan. Pendekatan tersebut digunakan untuk menentukan kadar yang memberikan kinerja paling efektif tanpa

mengasumsikan bahwa semakin tinggi persentase substitusi selalu menghasilkan mutu batako yang lebih baik.