BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sektor konstruksi di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kebutuhan infrastruktur, perumahan, dan bangunan gedung. Kondisi tersebut mendorong meningkatnya kebutuhan akan material konstruksi yang tidak hanya memiliki kekuatan yang baik, tetapi juga ekonomis serta memiliki durabilitas tinggi. Batako banyak digunakan sebagai material dinding karena ekonomis, efisien dalam pelaksanaan, dan memiliki durabilitas yang cukup baik, tetapi mempunyai bobot relatif tinggi serta rentan mengalami keretakan (Nastain & Hariyanto, 2023). Keretakan pada batako dapat terjadi akibat beban vertikal dari struktur bangunan sehingga perbedaan kekakuan antara unit batako dan mortar dapat menimbulkan tegangan yang memicu retak mikro (Dias, 2023). Kajian selanjutnya juga menunjukkan bahwa meskipun batako mendukung kekakuan lateral dan kenyamanan bangunan, keretakan masih menjadi salah satu kelemahannya. Penelitian substitusi, seperti yang dilakukan Rifa Nuryan dkk. (2026), umumnya hanya memperbaiki mikrostruktur dan sifat mekanis sehingga retak yang telah terbentuk tetap memerlukan perbaikan. Metode konvensional berupa *patch repair*, *grouting*, pengisian alur, dan injeksi perekat masih memerlukan intervensi eksternal (Singh dkk., 2026). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang meningkatkan sifat awal sekaligus memulihkan retak secara otonom melalui teknologi *self-healing*.

Teknologi pulih mandiri atau *self-healing* terus dikembangkan untuk mengatasi retak pada material berbasis semen. *Self-healing* adalah kemampuan material memperbaiki retak secara mandiri dari yang bertujuan memulihkan sebagian atau seluruh sifat fisik, mekanis, dan daya tahan material (Roig-Flores dkk., 2021). Secara umum, mekanisme *self-healing* dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu mikroenkapsulasi agen pemulih dalam kapsul khusus yang dicampur ke dalam benda uji dan pemanfaatan aktivitas metabolik mikroorganisme

dalam matriks semen untuk membentuk kalsit atau kalsium karbonat secara alami (Zhang dkk., 2024).

Teknologi *self-healing* melalui metode mikroenkapsulasi dan berbasis mikroorganisme memiliki mekanisme kerja yang berbeda. Pada metode mikroenkapsulasi agen penyembuhan akan dilindungi oleh kapsul yang kecil bersama material pengeras yang nantinya akan dimasukkan ke dalam matriks beton yang nantinya saat retak terbentuk, kapsul pecah dan melepaskan agen untuk menutup kerusakan secara mandiri (Jiang dkk., 2024). Salah satu bahan kimia yang digunakan yaitu *calcium sulfoaluminate* yang memiliki beberapa keterbatasan dalam kualitas ikatan antarmuka kapsul dengan matriks semen tidak selalu optimal, pembuatan cangkang kapsul yang kompleks, serta penurunan sifat mekanik beton akibat ketidakseragaman bentuk matriks sehingga meningkatkan jumlah *void* ketika kadar kapsul digunakan dalam jumlah besar (Adhikary dkk., 2024). Keterbatasan lainnya adalah ketahanan agen penyembuhan saat proses pencampuran dalam adukan yang memiliki efektivitas rendah pada retakan kurang dari 50 µm, jumlah agen penyembuhan yang dapat dienkapsulasi terbatas, dan keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas material (Naqvi & Raza, 2025). Terdapat pula penggunaan mikroenkapsulasi dengan cangkang polimer yang membutuhkan biaya produksi tinggi serta masa penyimpanan terbatas pada resin polimerik (Naqvi & Raza, 2025).

Mikroorganisme menutup retak melalui endapan kalsium karbonat yang dibentuk bakteri saat kontak dengan air sehingga memperpanjang umur layan material (Elgendy dkk., 2025). Kalimat tersebut menjelaskan bahwa bakteri dapat aktif ketika retakan terbentuk dan menghasilkan $CaCO_3$ untuk menutup retakan, sedangkan mikroenkapsulasi bergantung pada kerusakan kapsul. Kelebihan lain mikroorganisme yaitu setelah retakan tertutup bakteri akan kembali berhibernasi dan dapat aktif kembali jika retakan kembali mucul (Alimin dkk., 2025). Menunjukkan bahwa proses *self-healing* berpotensi berlangsung berulang, disisi lain mikroenkapsulasi umumnya bekerja sekali setelah kapsul pecah. Oleh karena itu, pendekatan bakteri menjanjikan penyembuhan retak yang berkelanjutan.

Berbagai penelitian telah menerapkan metode *self-healing* berbasis *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) dengan berbagai mikroorganisme, seperti *Bacillus sphaericus, Sporosarcina pasteurii*, *Bacillus subtilis*, dan *Bacillus megaterium*. Setiap jenis bakteri untuk metode mikroorganisme memiliki tantangan yang berbeda. Penggunaan *Bacillus sphaericus* pada Sebagian besar media kultur cair dikenal dengan hasil sporosasinya yang terbatas (Zhu dkk., 2021). Hal ini menjadi tantangan teknis dalam pembuatan kultur dalam media cair. Penelitian lain oleh Chen dkk. (2022), optimasi media kultur *Sporosarcina pasteurii* baru berhasil meningkatkan jumlah bakteri yang hidup namun belum mengoptimalkan aktifitas ureasenya, mengingat aktivitas urease tersebut penting dalam menganalisis mutu bakteri. Kondisi pH lebih tinggi dari 7 dapat menghambat proses pertumbuhan dan perkembangan *Bacillus megaterium*, sekaligus menurunkan efektivitas aktivitas urease bakteri tersebut (Shi dkk., 2022).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *Bacillus subtilis* memiliki kemampuan *self-healing* yang baik dan kompetitif sehingga berpotensi menjadi agen biologis penyembuh retak pada material berbasis semen. Selain itu, *Bacillus subtilis* mampu membentuk spora dorman tahan panas dan bertahan dalam matriks semen hingga aktif saat retak terbentuk (Elgendy dkk., 2025). Meski aktivitas metaboliknya relatif rendah, endosporanya dapat tumbuh secara anaerobik maupun aerobik melalui fermentasi dan bertahan hingga 200 tahun (Elgendy dkk., 2025). Jenis bakteri ini juga mampu beradaptasi dengan tingkat nilai pH tinggi (antara 12 dan 13) dan mampu bertahan pada lingkungan basa (Hammad dkk., 2025). Keberhasilan penerapan bakteri pada *self-healing* dipengaruhi oleh viabilitas dan kontrol sel bakteri. Sehingga dalam praktiknya, kultur bakteri menjadi bagian penting sebelum diinokulasikan pada matriks semen.

Bacillus subtilis umumnya dikultur menggunakan media komersial seperti *nutrient broth* karena mengandung pepton, ekstrak ragi, dan natrium klorida yang berfungsi sebagai nutrisi pertumbuhan dan perkembangbiakkan bakteri yang tidak mempunyai kebutuhan khusus seperti bakteri *Bacillus subtilis* (Izebe dkk., 2020). Secara fisiologis, pertumbuhan *Bacillus subtilis* memerlukan ketersediaan

makronutrien berupa sumber karbon dan nitrogen, serta mikronutrien berupa mineral dan faktor pertumbuhan lain yang berperan dalam metabolisme, sintesis biomassa, dan pembentukan metabolik sekunder. Namun, penggunaan *nutrient broth* relatif mahal dan mayoritas di*import* dari negara yang maju (Izebe dkk., 2020). Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan bahan pertanian lokal yang lebih ekonomis, mudah diperoleh, dan sesuai untuk pertumbuhan *Bacillus subtilis*.

Salah satu bahan pertanian yang dikembangkan sebagai media alternatif adalah sorgum. Izebe dkk. (2020), melaporkan bahwa media sorgum dapat menggantikan *nutrient broth* untuk menumbuhkan bakteri *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis* karena menghasilkan nilai kepadatan bakteri dan jumlah sel hidup yang hampir sama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sorgum memiliki kemampuan mendukung pertumbuhan bakteri yang relative setara dengan media komersial. Sorgum kaya akan karbohidrat, protein, mineral, asam amino, serta mikronutrien dan makronutrien yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme (Izebe dkk., 2020). Komposisi sorgum mengandung protein sekitar 12,3% dan pati sebesar 73,8–82,5% (Izebe dkk., 2020). Kandungan pati yang tinggi menunjukkan bahwa sorgum berpotensi menjadi sumber karbon bagi bakteri, sedangkan kandungan protein dapat menjadi sumber nitrogen dalam sintesis protein dan enzim mikroorganisme.

Meskipun sorgum terbukti efektif sebagai media alternatif, pemanfaatannya di Indonesia masih relatif terbatas. Di Indonesia memiliki kekayaan varietas sorgum namun dalam pengembangannya terkendala faktor teknis, sosial, budaya, dan persepsi masyarakat (Suarni, 2016). Dengan melihat kondisi tersebut membutuhkan alternatif lain yang sering dimanfaatkan dan memiliki kandungan yang relatif sama dengan sorgum. Biji jagung menjadi salah satu tanaman serealia dengan produksi yang melimpah serta kandungan nutrisinya relatif mendekati sorgum. Berdasarkan *Food and Agriculture Organization* (FAO) yang membahas topik *Gross Chemical Composition*, biji jagung mengandung 72–73% pati dan 1-3% gula. FAO juga menyebutkan bahwa unsur kimia lain yang dominan setelah pati adalah protein dengan kandungan berkisar 8-11% yang diperoleh dari varietas umum. Kemiripan kandungan tersebut menunjukkan bahwa jagung berpotensi dapat digunakan

sebagai sumber karbon dan nitrogen dalam media pertumbuhan bakteri. Hal ini didukung juga dengan penelitian yang dilakukan (Ren dkk., 2022), bahwa dalam pengembangan *Bacillus subtilis* pada media bubur jagung menghasilkan perkembangbiakan yang baik dibandingkan dengan *nutrient broth*.

Berdasarkan uraian di atas, penerapan teknologi *self-healing* berbasis bakteri melalui mekanisme *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP) berpotensi besar dalam memperbaiki retak pada material berbasis semen. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada beton dan mortar, sedangkan kajian pada material batako masih relatif terbatas. Selain itu, kebutuhan media kultur bakteri menggunakan *nutrient broth* juga menjadi kendala biaya. Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji pemanfaatan kultur *Bacillus subtilis* berbasis media cair jagung sebagai agen *self-healing* pada batako melalui mekanisme *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP).

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada permasalahan yang terjadi, maka dapat diidentifikasi sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penerapan *self-healing* terhadap perbaikan retak pada batako?
2. Bagaimana efektivitas penerapan *self-healing* terhadap kuat tekan sebelum diretakkan dan setelah terjadi perbaikan pada retakan?
3. Bagaimana pengaruh penerapan *self-healing* terhadap daya serap sebelum diretakkan dan setelah terjadi perbaikan pada retakan?
4. Bagaimana perbandingan harga batako konvensional dan batako *self-healing* berdasarkan biaya produksi per unit yang dikeluarkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah, maka dapat dipaparkan tujuan sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh penerapan *self-healing* terhadap kemampuan penyembuhan retak pada batako.

2. Mengetahui pengaruh penerapan *self-healing* terhadap kuat tekan batako sebelum diretakkan dan setelah diretakkan.
3. Mengetahui pengaruh penerapan *self-healing* terhadap daya serap batako sebelum diretakkan dan setelah diretakkan.
4. Menganalisis biaya pembuatan batako konvensional dibandingkan dengan batako *self-healing* per unit.

1.4 Manfaat Penelitian

Mengacu pada tujuan di atas, penelitian ini memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Manfaat bagi penulis
    a. Menambah pemahaman mengenai penerapan inovasi *self-healing* menggunakan media kultur sederhana melalui mekanisme MICP berbasis bakteri.
    b. Meningkatkan kemampuan analisis ilmiah penulis dalam merancang, melaksanakan, dan mengevaluasi penelitian berbasis eksperimental di bidang material konstruksi khususnya inovasi batako.
    c. Berfungsi sebagai wadah pengaplikasian keilmuan teknik sipil, khususnya pada teknologi bahan bangunan, inovasi pada material, dan rekayasa material yang berkesinambungan.
2. Manfaat bagi pembaca
    a. Memberikan pengetahuan ilmiah mengenai potensi bakteri *Bacillus subtilis* yang dapat dimanfaatkan sebagai agen *self-healing* pada bahan berbasis semen, khususnya pada inovasi batako.
    b. Menambah bahan rujukan mengenai alternatif pemanfaatan media kultur berbasis bahan alami untuk diaplikasikan pada *self-healing* yang menggunakan mikroorganisme.
    c. Berfungsi sebagai sumber informasi pada penelitian yang ingin melanjutkan penelitian serupa mengenai biomaterial konstruksi, *self-healing*, maupun inovasi batako yang ramah lingkungan pada kesempatan mendatang.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini memberikan batasan arah gerak penelitian sebagai berikut.

1. Merencanakan ukuran dan klasifikasi batako menggunakan acuan SNI 03-0348-1989 dengan ukuran batako sedang 30x10x15 cm untuk menyamakan ukuran batako yang dijual di pasaran.
2. Pengujian yang dilakukan pada batako hanya meliputi lingkup pemulihan retakan, kuat tekan, daya serap pada batako konvensional dengan batako inovasi, serta membandingkan harga batako konvensional dengan batako *self-healing.*
3. Menggunakan bakteri jenis *Bacillus subtilis* dengan media kultur biji jagung sebagai substitusi air.
4. Pemulihan retakan batako diamati secara visual dengan mata dan menggunakan *image analysis* berbasis perangkat lunak Fiji/ImageJ.
5. Terjadinya reaksi kimia pada material yang ada di dalam campuran batako tidak dijelaskan secara detail.
6. Tidak melakukan pengujian mikrostruktur untuk mengukur aktivitas bakteri dan distribusi endapan kalsit pada bagian dalam batako.