

INOVASI BETON ADAPTIF: OPTIMALISASI *SELF-HEALING CONCRETE* UNTUK MITIGASI RETAKAN DAN STRUKTUR BERKELANJUTAN : ARTIKEL REVIU

Nadia Alvi Kurniasih, Kiara Rennita Nurhasanah, April Lia Febriyani, Rachmaida Janiza
Bimantoro, Susilowati, Zahra Bunga Khairumaynisa, Vania Cahya Zakiyyah, Yenny
Nurchasanah*

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah

*Email: yn205@ums.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan dengan analisis revidu yang bertujuan untuk menganalisis perkembangan beton adaptif melalui teknologi *self-healing concrete* guna meningkatkan ketahanan struktur terhadap retakan dan mendukung keberlanjutan infrastruktur. Metode yang digunakan adalah analisis kualitatif terhadap 21 artikel ilmiah terpilih, yang mencakup berbagai pendekatan mekanisme penyembuhan, pemanfaatan agen biologis seperti *Bacillus subtilis* dan *Bacillus megaterium*, serta integrasi bahan tambahan ramah lingkungan seperti limbah plastik, sayuran, dan biochar. Teknologi *Self Healing Concrete* bekerja dengan membentuk endapan kalsium karbonat yang menutup celah retakan saat terjadi kerusakan. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa *Self Healing Concrete* secara konsisten mampu menutup retakan selebar 0,3–0,7 mm, meningkatkan kekuatan tekan hingga 15–20%, serta mengurangi permeabilitas beton terhadap air dan ion klorida. Selain memperpanjang umur layanan struktur dan menekan biaya perawatan, teknologi ini juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah domestik dan industri. Namun, adopsi *Self Healing Concrete* secara luas masih menghadapi tantangan seperti biaya produksi yang tinggi dan belum tersedianya standar teknis nasional. Dengan demikian, *Self Healing Concrete* memiliki prospek besar sebagai material konstruksi masa depan, terutama untuk infrastruktur yang sulit dijangkau untuk pemeliharaan rutin.

Kata kunci: agen biologis, material ramah lingkungan, pembangunan berkelanjutan, *self-healing concrete*, teknologi bakteri,

Abstract

This research was conducted through a review analysis aimed at analyzing the development of adaptive concrete through self-healing concrete technology to enhance the structural resilience against cracks and support infrastructure sustainability. The method used is a qualitative analysis of 21 selected scientific articles, which encompass various approaches to healing mechanisms, the utilization of biological agents such as Bacillus subtilis and Bacillus megaterium, as well as the integration of environmentally friendly additives like plastic waste, vegetables, and biochar. The Self Healing Concrete technology works by forming calcium carbonate deposits that fill the cracks when damage occurs. Review results show that Self Healing Concrete consistently closes cracks of 0.3–0.7 mm wide, increases compressive strength by 15–20%, and reduces the permeability of concrete to water and chloride ions. In addition to extending the service life of structures and reducing maintenance costs, this technology also supports the principles of sustainable development through the utilization of domestic and industrial waste. However, the widespread adoption of Self Healing Concrete still faces challenges such as high production costs and the absence of national technical standards. Thus, Self Healing Concrete has great prospects as a future construction material, especially for infrastructure that is difficult to access for routine maintenance.

Keywords: Bacterial Technology, Biological Agents, Eco-Friendly Materials, Self-Healing Concrete, Sustainable Development

1. PENDAHULUAN

Beton adalah salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena kekuatannya yang tinggi, tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan, dan mudah digunakan. Namun, meskipun ada keuntungan dalam produksinya, ada kekhawatiran tentang konsekuensi lingkungannya. Ini terutama terkait dengan kebutuhan energi yang tinggi dan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan (Mostofnejad dkk., 2020). Retakan mikro dan makro, yang dapat mengganggu integritas struktural dalam jangka panjang, adalah masalah lain yang sering terjadi saat menggunakan beton.

Retakan pada beton dapat membuatnya lebih rentan terhadap air dan zat kimia berbahaya, yang dapat menyebabkan korosi tulangan dan kerusakan lebih lanjut pada struktur. Akibatnya, metode perbaikan yang cepat dan efektif diperlukan untuk menangani retakan secepat mungkin. Namun, metode perbaikan tradisional seperti injeksi dan pelapisan ulang memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam hal menjangkau retakan mikro dan dampak ekonomi dan lingkungan (Gumelar dkk., 2020).

Teknologi *Self-Healing Concrete* (SHC) mulai dikembangkan dan menjadi perhatian dalam dunia konstruksi sebagai solusi terhadap masalah tersebut. SHC adalah teknologi beton baru yang dapat digunakan untuk memperbaiki kerusakan internal tanpa bantuan manusia. Ini cocok untuk struktur yang sulit dijangkau seperti terowongan, pondasi bawah tanah, dan jembatan. Karena kemampuan untuk mengurangi limbah perbaikan dan menekan emisi karbon, teknologi ini dianggap memenuhi prinsip pembangunan berkelanjutan (Wibowo & Kristanto, 2025).

Saat ini, metode pengembangan SHC menggunakan berbagai inovasi. Ini termasuk penggunaan bakteri seperti *Bacillus Megaterium* dan *Bacillus Subtilis*, serta bahan tambahan seperti *biochar* dan *fly ash* serta limbah daur ulang. Inovasi ini dapat memperbaiki retakan dan meningkatkan kekuatan mekanik, ketahanan struktur, dan biaya siklus hidup.

Kajian teknologi SHC menjadi penting seiring dengan kebutuhan akan material konstruksi yang efisien dan ramah lingkungan. Ini terutama berlaku untuk pembangunan infrastruktur di Indonesia. Dengan memanfaatkan sumber daya lokal yang tersedia dan mempertimbangkan kondisi iklim tropis, pengembangan SHC diharapkan dapat menjadi solusi yang berguna untuk mendukung konstruksi berkelanjutan di masa depan.

2. METODOLOGI

Penelitian ini merupakan studi literatur atau *review paper*, yang bertujuan untuk mengkaji, membandingkan, dan menganalisis berbagai metode, bahan, serta efektivitas penerapan teknologi *self-healing concrete* yang telah diteliti dalam sejumlah publikasi ilmiah. Fokus utama diarahkan pada perbandingan antara mekanisme *autogenous* dan *autonomous self-healing*, serta bahan-bahan agen penyembuh seperti bakteri, enkapsulasi, limbah organik, dan aditif kristalin.

Metode yang dilakukan dalam penelitian ini dengan memeriksa 21 artikel ilmiah dari jurnal nasional dan internasional yang terkait dengan teknologi SHC. Artikel yang dianalisis dapat diperoleh dari *database* seperti *Scopus*, *Google Scholar*, dan Garuda. Artikel ini akan fokus pada hasil laboratorium klinis yang membahas mekanisme penyembuhan, bahan tambahan seperti bakteri dan limbah, peningkatan mekanisme, dan tantangan aplikasi untuk 2022-2025. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif untuk memberikan citra komprehensif tentang efektivitas dan pandangan teknologi ini.

3. SELF HEALING CONCRETE

Concrete self-healing adalah jenis beton baru yang memiliki kemampuan untuk menyembuhkan atau memperbaiki keretakan secara otomatis tanpa bantuan manusia. Beton jenis ini dibuat dengan cara yang memungkinkan mereka menutup retak kecil yang disebabkan oleh beban, perubahan suhu, atau faktor lingkungan lainnya selama masa pakainya. Teknik ini dimaksudkan untuk meningkatkan ketahanan beton dan durabilitas sekaligus mengurangi biaya pemeliharaan dan perbaikan infrastruktur dalam jangka panjang (Gumelar & Nuraini, 2020).

Salah satu masalah utama dengan beton konvensional adalah retakan. Ini karena air, ion klorida, karbon dioksida, dan zat agresif lainnya dapat masuk ke dalam beton, merusak tulangan bajanya, mempercepat proses korosi, dan pada akhirnya melemahkan struktur. Namun, beton yang mampu pulih sendiri memungkinkan retakan ini tertutup secara otomatis, mencegah kerusakan lebih lanjut dan memperpanjang umur struktur.

4. KINERJA MEKANIS SELF HEALING CONCRETE

4.1. Inovasi Teknologi dan Mekanisme *Self-Healing Concrete* (SHC)

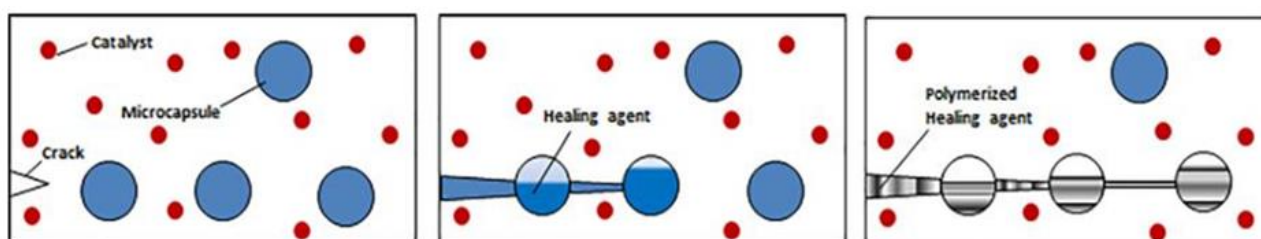
Self-Healing Concrete (SHC) muncul sebagai solusi kreatif untuk mengurangi biaya pemeliharaan beton dan memperpanjang masa layannya. Konsep utamanya adalah memberikan kemampuan pada beton untuk memperbaiki retakan kecil secara mandiri tanpa bantuan manusia. Karena menggabungkan prinsip mikrobiologi, rekayasa sipil, dan kimia material, SHC dianggap sebagai kemajuan besar dalam ilmu material modern.

Secara umum, mekanisme penyembuhan diri beton terbagi menjadi dua kategori, yaitu *autogenous* dan *autonomous*. Mekanisme *autogenous* bergantung pada komponen material asli dalam beton, seperti hidrasi

lanjutan dari semen yang belum bereaksi, untuk memperbaiki retakan secara alami (Ghazy dkk., 2024). Sementara itu, mekanisme *autonomous* memerlukan penambahan bahan aktif eksternal, seperti bakteri atau mikrokapsul polimer, yang secara aktif memperbaiki retakan ketika terjadi kerusakan.

Salah satu inovasi paling menonjol dari mekanisme *autonomous* adalah penggunaan bakteri *Bacillus Subtilis* yang mampu bertahan dalam kondisi alkali ekstrem di dalam beton. Ketika beton mengalami retak dan air masuk, bakteri ini akan mengendapkan kalsium karbonat (CaCO_3) untuk menutup celah tersebut. Penelitian oleh Ghazy dkk. (2024) dan Rahita dkk. (2024) menunjukkan bahwa retakan selebar 0,3–0,5 mm dapat tertutup dalam waktu kurang dari dua minggu dengan bantuan bakteri tersebut.

Selain bakteri, teknologi enkapsulasi juga berkembang sebagai pendekatan inovatif dalam SHC. Dalam metode ini, mikrokapsul yang berisi zat penyembuh ditambahkan ke dalam campuran beton. Ketika terjadi retakan, kapsul akan pecah dan melepaskan zat penyembuh yang bereaksi dengan udara dan oksigen membentuk CaCO_3 , yang kemudian mengisi retakan (Hafizh dkk., 2024). Ilustrasi pecahnya mikrokapsul saat beton mengalami retak dapat dilihat pada Gambar 1. Meskipun masih menghadapi tantangan teknis seperti kompatibilitas bahan dan daya tahan mikrokapsul, teknologi ini tetap menjanjikan untuk pengembangan SHC di masa depan.



Gambar 1. Ilustrasi pecahnya mikrokapsul saat beton mengalami retak. (Hafizh dkk., 2024)

4.2. Efektivitas Bakteri dan Bahan Tambahan

Beton *self-healing* yang menggunakan bakteri dan bahan tambahan dapat meningkatkan kinerja mekanis beton, termasuk memperbaiki retakan, meningkatkan kekuatan tekan, dan meningkatkan durabilitasnya. Penelitian menemukan bahwa komposisi bakteri *Bacillus subtilis* sangat mempengaruhi efektivitas penyembuhan diri. Kandungan bakteri 0,6% dan 1,5% meningkatkan frekuensi pada uji *Impact-Echo* (IE), menunjukkan proses perbaikan yang efektif, sementara kandungan bakteri 0,1% menurunkan frekuensi, menunjukkan efektivitas yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa banyaknya bakteri berkontribusi terhadap keberhasilan proses penyembuhan diri (Rahita dkk., 2024).

Metode imobilisasi bakteri juga mempengaruhi efektivitas penyembuhan. Ghazy dkk (2024) menemukan bahwa *Bacillus subtilis* yang diimobilisasi dalam partikel karet (tanpa kalsium laktat) mampu menyembuhkan retakan hingga 1,5 mm dan meningkatkan kekuatan tekan hingga 71%. Temuan ini menunjukkan bahwa bakteri yang dikombinasikan dengan bahan pendukung tertentu lebih efektif daripada mekanisme penyembuhan alami beton (Ghazy dkk., 2024).

Selain itu, bahan tambahan seperti urea dan kalsium laktat turut meningkatkan kinerja bakteri. Menurut Alepu dkk. (2024) nutrisi pendukung tersebut meningkatkan fungsi bakteri dengan menghasilkan pengendapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang menutup retakan mikro. Selaras dengan itu, Lirawati dkk. (2024) menemukan bahwa menggabungkan bakteri dengan limbah puntung rokok meningkatkan ketahanan beton terhadap air setelah 14 hari perendaman, menunjukkan bahwa bahan tambahan mampu memperkuat performa penyembuhan diri.

Namun, efektivitas bakteri juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Vishal dkk. (2025) mengungkapkan bahwa paparan termal berkepanjangan menghambat fungsi bakteri dalam matriks beton. Sebaliknya, Lin dkk. (2025) menunjukkan bahwa penggunaan biochar serta metode perawatan basah-kering dapat meningkatkan keuletan beton dan efisiensi penyembuhan diri melalui pembentukan kristal yang lebih besar.

Lebih lanjut, efektivitas jangka panjang dari bakteri juga telah dibuktikan. Fauziah dkk. (2023) menunjukkan bahwa beton dengan bakteri mengalami peningkatan kekuatan tekan sebesar 12,66% pada umur 28 hari, meskipun pada umur 7 hari bakteri belum aktif sepenuhnya. Temuan serupa menyatakan bahwa *Bacillus megaterium* mampu meningkatkan kekuatan tekan beton pada umur 28 dan 56 hari, menunjukkan adanya efek penyembuhan diri yang berkelanjutan (Farhan dkk., 2025).

4.3. Perbandingan Material Tambahan Alternatif Limbah plastik

Memanfaatkan limbah sebagai bahan tambahan atau pengganti untuk campuran beton telah meningkatkan keberlanjutan dan mengurangi dampak negatif industri konstruksi terhadap lingkungan. Penelitian oleh Rochman dkk. (2023) yang menggunakan limbah plastik cor sebagai agregat kasar dalam beton merupakan contohnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun proporsi limbah plastik meningkat, kekuatan tekan beton tetap dapat digunakan untuk komponen non-struktural. Karena bobotnya yang ringan dan kemudahan pemrosesannya, menjadikannya pilihan yang menarik untuk bangunan yang membutuhkan peredaman suara atau insulasi termal. Penggunaan limbah plastik juga dianggap lebih ramah lingkungan karena mengurangi akumulasi sampah *non-biodegradable*.

Penelitian oleh Rochman dkk. (2023) untuk mengetahui cara pembuatan agregat kasar berbahan plastik cor yang memenuhi standar SNI 03-2834-2000, untuk mengetahui *workability* adukan beton segar yang menggunakan agregat kasar dari limbah plastik cor, dan untuk mengetahui kuat tekan beton dengan agregat kasar dari limbah plastik cor

Metode ini juga digunakan untuk mengeksplorasi bahan alternatif. Biochar digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran semen yang dikombinasikan dengan campuran kristal (CA). Studi oleh Lin dkk. (2025) menemukan bahwa komposit biochar-semen dapat meningkatkan mekanisme penyembuhan sendiri, terutama dalam kondisi pengawetan siklus basah-kering. Jalur retakan yang lebih berliku dibuat oleh biochar, yang meningkatkan kemampuan penyembuhan diri beton. Selain itu, biochar meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi ion klorida. Karena itu, material ini sangat cocok untuk diterapkan pada konstruksi yang berada di dekat laut atau iklim tropis yang lembab.

Selain biochar, inovasi juga datang dari bahan limbah rumah tangga seperti cangkang telur. Putra dkk. (2023) meneliti penggunaan bubuk cangkang telur sebagai pengganti parsial semen dalam campuran beton. Dengan konsentrasi optimal sebesar 2,5%, penurunan kuat tekan hanya sedikit dan masih dalam batas yang dapat diterima, metode ini memiliki potensi untuk mengurangi penggunaan semen yang produksinya dikenal menyebabkan emisi karbon tinggi serta mengurangi limbah.

Limbah organik sekarang menjadi perhatian sebagai bahan aditif kreatif selain limbah anorganik. Harmiyati dkk. (2023) melakukan penelitian tentang penggunaan ekstrak limbah sayuran dalam campuran beton yang dapat menyembuhkan sendiri. Kemampuan pemulihan retakan meningkat secara signifikan pada konsentrasi ekstrak yang tinggi; namun, pada konsentrasi 7%, terjadi penurunan nilai slump dan kuat tekan awal. Endapan alami yang dihasilkan dari reaksi senyawa organik dalam ekstrak sayuran mempercepat penutupan retakan. Akibatnya, metode ini dianggap sesuai untuk diterapkan pada bangunan non-struktural yang berada di wilayah kota yang rentan terhadap retakan mikro.

Secara keseluruhan, berbagai penelitian menunjukkan bahwa limbah organik dan anorganik memiliki potensi besar untuk digunakan dalam teknologi beton berkelanjutan. Inovasi ini meningkatkan kinerja material dan mengurangi dampak negatif sektor konstruksi terhadap lingkungan.

4.4. Evaluasi Kuat Tekan dan Ketahanan Beton

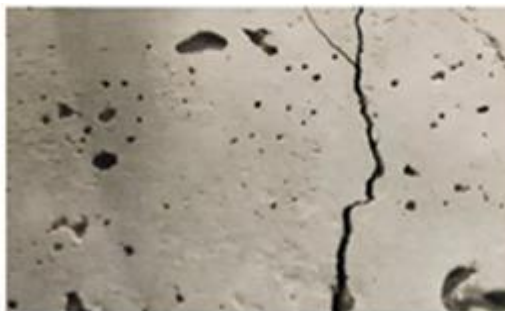
Penelitian oleh Lirawati (2024) menemukan bahwa limbah puntung rokok memengaruhi penyembuhan dan mampu meningkatkan kuat tekan. Hasil ini membuka jalan untuk penggunaan limbah berbahaya sebagai bahan tambahan kreatif dalam teknologi beton yang ramah lingkungan.

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tekan beton (Idris dkk., 2024)

No	Variasi Beton	Umur (hari)	Beton (kN)	Kuat Tekan (Mpa)	Kuat Tekan Rata-rata (Mpa)
1.	Beton Normal (BN)	14 hari	277	15,683	14,846
			259	14,664	
			251	14,211	
		28 hari	333	18,854	16,664
			258	14,607	
			292	16,532	
2.	Beton Serat Putung Rokok 0,5% (BPR)	14 hari	110	6,228	8,341
			173	9,795	
			159	9,002	
		28 hari	167	9,455	9,132
			186	10,531	
			131	7,41	

Metode ini juga memungkinkan bakteri untuk berfungsi sebaik mungkin dalam sistem beton yang mampu pulih sendiri, yang menghasilkan peningkatan kekuatan tarik belah (*split tensile strength*) beton. Beberapa jenis bakteri, seperti *Solibacillus*, *Bacillus*, dan *Staphylococcus*, digunakan dalam penelitian mereka bersama dengan nutrisi pendukung, seperti urea dan kalsium laktat. Endapan kalsium karbonat (CaCO_3) dihasilkan oleh kombinasi ini, yang menutup retakan mikro, meningkatkan kekuatan beton, dan memperkuat ikatan internalnya (Alepu dkk., 2024). Penelitian yang dilakukan oleh Haikal dkk. (2024) menyatakan bahwa hasil kuat tekan pengujian beton selama 28 hari menunjukkan beton dengan kandungan 0,7% bakteri nilai kuat tekan lebih besar daripada beton dengan persentase bakteri 0%; 0,5%; dan 0,6%.

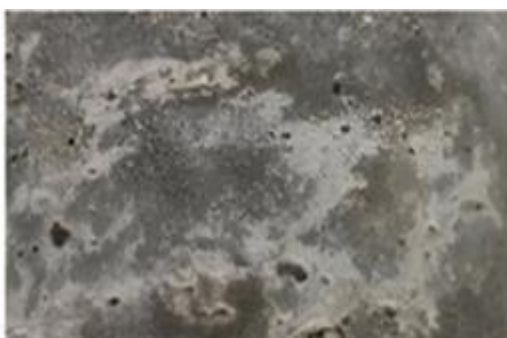
Studi juga menunjukkan bahwa kombinasi beton bermutu tinggi dan teknologi *self-healing* meningkatkan daya tahan terhadap kerusakan struktural dan meningkatkan umur layanan infrastruktur secara keseluruhan.



Gambar 2. Retakan beton sebelum pengujian *self-healing concrete*. (Lirawati dkk., 2024)



Gambar 3. Retakan beton setelah perendaman selama 7 hari. (Lirawati dkk., 2024)





Gambar 4. Retakan beton setelah perendaman selama 14 hari. (Lirawati dkk., 2024)

4.5. Pemanfaatan teknologi beton penyembuh-diri (*self-healing concrete*) dengan menggunakan bakteri *Bacillus megaterium*.

Beton konvensional sangat rentan mengalami retakan mikro yang dapat menyebabkan kerusakan lebih lanjut karena penetrasi air dan zat agresif. Dalam penelitian ini, bakteri dimanfaatkan karena kemampuannya untuk menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui proses biologis saat terpapar air dan nutrisi tertentu. (Putra dkk., 2023) melakukan pengujian komposisi tanpa bakteri dan dengan bakteri, berikut hasil analisis fisiknya:

Tabel 2. Analisis benda fisik benda uji (Putra dkk., 2023)

Uji komposisi tanpa bakteri	
	Rongga pada beton cukup kecil sehingga beton tidak mudah menyerap air dan lebih kuat dari benda uji pendahuluan sebelumnya. Berat jenis benda uji berkisar antara $614,49 \text{ kg/m}^3 - 888,73 \text{ kg/m}^3$.
Uji komposisi dengan bakteri	
	Rongga pada beton sangat kecil dan jarang karena tertutup oleh endapan kalsit pada bakteri sehingga beton tidak mudah menyerap air yang banyak. Berat jenis benda uji berkisar antara $730,80 \text{ kg/m}^3 - 1354,06 \text{ kg/m}^3$. Hal ini dikarenakan peran <i>Bacillus Subtilis</i> menutup celah atau rongga pada beton.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa beton yang ditambahkan *Bacillus megaterium* memiliki kemampuan memperbaiki retak secara otomatis, meningkatkan kekuatan tekan setelah proses penyembuhan, serta menurunkan nilai permeabilitas air, sehingga lebih tahan terhadap kerusakan jangka panjang. Bakteri *Bacillus* yang pada fase dorman (tidur atau tidak aktif) membentuk spora karena menyesuaikan terhadap lingkungan baru dan akan aktif ketika ada air atau udara, bakteri akan bereaksi karena terdapat karbon dioksida yang dihasilkan akibat respirasi bakteri. Penelitian ini menunjukkan potensi besar penggunaan mikroorganisme dalam meningkatkan umur layanan dan efisiensi perawatan struktur beton.

Yanuar dkk. (2023) melakukan pengujian kuat tekan benda uji kubus dilaksanakan dengan mesin *Compressive Test Machine* (CTM) pada saat beton mencapai umur 28 hari. Berikut hasil berat jenis dan kuat tekan:

Tabel 3. Hasil berat jenis dan uji kuat tekan pada uji komposisi tanpa bakteri (Yanuar dkk., 2023)

RUN	σ (MPa)	BJ (kg/m^3)	Harga (Rp)
1	0,90	614,49	1,71 jt
2	0,92	705,81	1,55 jt
3	2,09	757,66	1,73 jt
4	2,38	888,73	1,83 jt
5	1,29	624,32	1,73 jt
6	1,18	715,92	1,64 jt
7	1,77	807,38	1,66 jt
8	2,06	769,11	1,61 jt
9	1,01	647,86	1,59 jt
10	1,21	675,56	1,60 jt

Tabel 4. Hasil berat jenis dan uji kuat tekan uji komposisi dengan bakteri (Yanuar dkk., 2023)

RUN	σ (MPa)	BJ (kg/m ³)	Harga (Rp)
1B	4,03	984,34	4,22 jt
2B	3,18	730,80	4,22 jt
3B	4,70	1018,73	4,35 jt
4B	11,68	1354,06	4,99 jt
5B	5,55	977,82	4,33 jt
6B	3,04	795,76	4,26 jt
7B	3,13	741,04	4,18 jt
8B	6,04	992,59	4,11 jt
9B	3,85	876,79	4,06 jt
10B	5,81	900,86	4,06 jt

4.6. Penambahan Bahan Beton Ramah Lingkungan Untuk Dampak Berkelanjutan

Penerapan kembali limbah plastik menandakan arah baru teknologi beton yang bersifat berkelanjutan. Teknologi ini tidak hanya menjawab tantangan struktural, tetapi juga menjadi solusi atas persoalan limbah domestik dan industri. Seperti penambahan limbah plastik di dalam perkerasan jalan aspal, kelebihannya dapat mengurangi limbah dan baik untuk kesehatan dan lingkungan, sedangkan kekurangannya penambahan limbah plastik yang berlebihan juga dapat mempengaruhi mutu dan karakteristik dari perkerasan jalan tersebut mempengaruhi umur jalan (Dwijayanti dkk., 2024).

Beton non-pasir adalah material konstruksi yang menjanjikan dengan performa mekanis dan durabilitas yang dapat dioptimalkan melalui penambahan berbagai bahan seperti abu terbang, serbuk kaca, pozzolan, dan bahan daur ulang. Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya *Fly Ash* (Abu Terbang) dan *superplasticizer* terbukti meningkatkan kekuatan tekan, durabilitas, serta struktur mikro beton non-pasir, namun dapat menurunkan *workability* (kelancaran pengerjaan) yang memerlukan penyesuaian komposisi campuran. Bahan tambahan pozzolan, abu vulkanik, dan serbuk kaca memberikan peningkatan dalam hal kekuatan tekan serta permeabilitas beton non-pasir. Pozolan khususnya efektif dalam memperbaiki sifat permeabilitas tanpa mengorbankan kekuatan mekanis Nano silika. Menunjukkan efek signifikan dalam meningkatkan struktur mikro dan durabilitas beton, terutama dalam meningkatkan kekuatan tekan. Serbuk kulit telur dan serbuk ban bekas sebagai bahan tambahan memberikan peningkatan dalam beberapa aspek, seperti kuat tekan, ketahanan, dan isolasi termal, meskipun ada beberapa (Purnamasari dkk., 2024).

Penggunaan serat *polypropylene* yaitu serat sintesis berbentuk filamen tunggal. Serat ini bisa ditemukan pada botol plastik dalam campuran beton dengan penggunaan PET. Akan tetapi Proporsi penambahan bahan tambah cacahan masker dan botol plastik jenis PET dengan persentase kandungan menurunkan kuat tekan jika dibandingkan dengan beton normal atau nol persen kandungan. Dari hasil pengujian kuat tekan dari enam sampel yang telah ditambahkan cacahan botol plastik dan masker, sampel yang memiliki hasil paling maksimum terjadi pada sampel tiga. Beton dengan penambahan cacahan botol plastik jenis PET paling rendah 5% pada agregat halus dan penambahan serat masker dengan persentase paling tinggi 0,3% dari berat semen memberikan nilai kuat tekan paling tinggi dibanding campuran lainnya (Kurnianingsih dkk., 2022).

Tabel 5. Proporsi campuran beton variasi tambahan serat plastik PET dan serat masker (Kurnianingsih dkk., 2022)

Material	Plastik	5%			10%			Normal (kg)
	Masker	0,10%	0,20%	0,30%	0,10%	0,20%	0,30%	
semen <i>portland</i>		446	446	446	446	446	446	446
air		237	237	237	237	237	237	237
agregat halus		747	747	747	708	708	708	787
agregat kasar		1132	1132	1132	1132	1132	1132	1132
botol plastik		39	39	39	79	79	79	0
masker		0	1	1	0	1	1	0

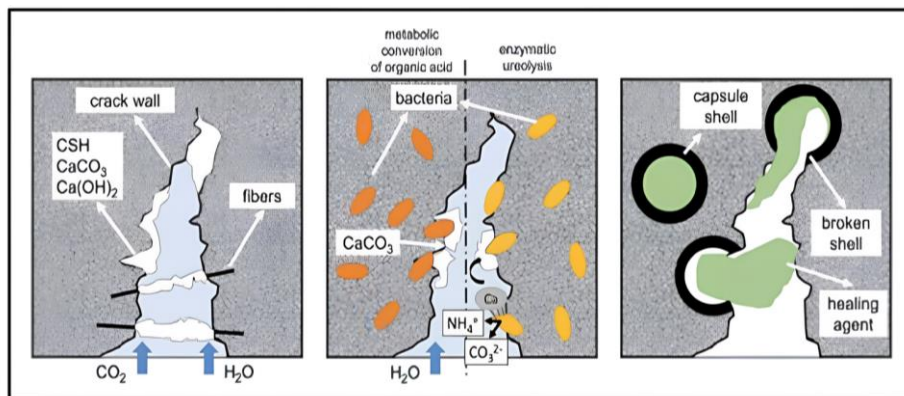
Tabel 6. Hasil pengujian kuat tekan beton variasi tambahan serat plastik pet dan serat masker (Kurnianingsih dkk., 2022)

%Plastik	5%			10%			
%Masker	0,10%	0,20%	0,30%	0,10%	0,20%	0,30%	
UMUR	Kuat Tekan			Kuat Tekan (kN/m ²)			
	Beton Normal	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5	Sampel 6
7	153,03	76,51	55,65	97,38	41,73	27,82	13,91
14	220,00	103,59	75,34	131,84	56,50	37,67	18,83
28	235,42	117,71	85,61	149,82	64,21	42,80	21,40

4.7. Kesiapan Implementasi di Lapangan

SHC memiliki prospek besar, implementasinya perlu didukung kebijakan teknis dan infrastruktur pendukung. Kendala terbesar meliputi biaya produksi awal, ketahanan agen biologis, dan penerimaan industri konstruksi. Oleh karena itu, perlu strategi integrasi teknologi SHC ke dalam sistem desain, konstruksi, dan perawatan infrastruktur nasional. (Emara dkk., 2024)

Untuk mengembangkan standar dan regulasi yang mendukung pemanfaatan SHC, diperlukan kolaborasi lintas sektor antara peneliti, pembuat kebijakan, dan pelaku industri. Insentif riset dan pengembangan serta program pelatihan diperlukan untuk meningkatkan pemahaman dan keterampilan teknis dalam penggunaan SHC pada skala industri. Diharapkan teknologi SHC dapat membantu pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan tangguh di masa depan berkat pendekatan terpadu ini.

Gambar 5. Proses *self healing concrete* pada beton. (Ayteki dkk., 2023)

4.8. Studi Kasus Penerapan *Self-Healing Concrete* di Dunia Nyata

Penerapan teknologi *Self-Healing Concrete* (SHC) telah dilakukan dalam beberapa proyek infrastruktur di negara maju seperti Belanda dan Inggris. Salah satu studi menunjukkan penggunaan SHC pada pelat jembatan di Belanda dengan hasil positif dalam pengurangan frekuensi retakan dan penghematan biaya pemeliharaan. Di Inggris, proyek uji coba SHC digunakan pada terowongan rel kereta bawah tanah yang sulit dijangkau untuk perawatan rutin, dan menunjukkan kemampuan beton dalam menutup retakan mikro secara otomatis dalam waktu kurang dari dua minggu.

Studi-studi ini membuktikan bahwa SHC tidak hanya konsep teoritis, namun telah diuji secara praktis dengan dampak signifikan terhadap performa struktur jangka panjang. Hal ini menjadi bukti bahwa SHC sangat relevan untuk diadopsi pada infrastruktur Indonesia, terutama struktur bawah tanah, jembatan, dan gedung tinggi yang memerlukan efisiensi perawatan (Jonkers 2015).

Adaptasi dengan iklim tropis Indonesia, *Self Healing Concrete* (SHC) berbasis bakteri seperti *Bacillus pseudofirmus* untuk menginduksi presipitasi kalsium karbonat (CaCO_3) yang dihasilkan oleh metabolisme bakteri dalam lingkungan dengan kadar Kalsium tinggi. Bakteri harus memungkinkan untuk menemukan nutrisi di lingkungan beton. Agar bakteri dapat bertahan hidup di lingkungan semen yang sangat basa dan tekanan kompresi internal, jenis bakteri yang tepat harus dipilih. Mikroorganisme *Bacillus subtilis* dan *Bacillus pasteurii*, memiliki peran yang produktif dalam penyembuhan fraktur beton. Lapisan CaCO_3 yang mereka hasilkan dapat menahan hujan asam pada tingkat tertentu dan secara efektif mencegah korosi tulangan baja, terutama di lingkungan laut. Studi menunjukkan bahwa formula *Self Healing Concrete* (SHC) dapat disesuaikan untuk lingkungan Indonesia. (Sangadji dkk., 2017)

5. KESIMPULAN

Self-Healing Concrete (SHC) adalah inovasi dalam teknologi material beton yang dapat memperbaiki retakan secara otomatis tanpa campur tangan manusia. Teknologi ini dapat mengatasi masalah keretakan pada beton konvensional, yang menyebabkan penurunan kualitas dan umur layanan bangunan.

Pembentukan endapan kalsium karbonat yang mengisi retakan adalah mekanisme utama SHC. Ini dapat terjadi melalui proses *autogenous* (alami) atau *autonomous* (dengan bantuan agen seperti bakteri). Studi menunjukkan bahwa SHC dapat secara mandiri menutup retakan selebar 0,3 hingga 0,7 mm. Ini berarti beton lebih tahan terhadap infiltrasi air dan ion korosif seperti klorida. Menjaga integritas struktur sangat penting, terutama di lingkungan yang agresif seperti pesisir dan iklim tropis.

Dalam campuran beton, penggunaan bakteri seperti *Bacillus Subtilis* dan *Bacillus Megaterium* telah terbukti meningkatkan kekuatan tekan beton secara signifikan, kadang-kadang hingga 71%. Penggunaan bahan tambahan dari limbah domestik dan industri seperti biochar, cangkang telur, dan plastik meningkatkan kinerja beton dan membantu pengelolaan limbah dan pelestarian lingkungan.

SHC menawarkan keunggulan dalam pembangunan berkelanjutan, seperti memperpanjang umur struktur dan mengurangi frekuensi perawatan, menekan biaya pemeliharaan dan dampak lingkungan dari konstruksi. Namun demikian, implementasi teknologi ini masih menghadapi beberapa masalah, seperti biaya produksi yang relatif tinggi dan tidak adanya standar teknis nasional yang mengatur penggunaan SHC.

Selain itu, kondisi lingkungan sangat memengaruhi efektivitas SHC. Paparan suhu tinggi dan kondisi ekstrim dapat menghambat aktivitas bakteri yang bertanggung jawab atas proses penyembuhan. Karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan SHC dalam berbagai kondisi geografis dan iklim.

Secara keseluruhan, beton *self-healing* memiliki potensi besar sebagai material konstruksi masa depan yang tahan lama, efisien, dan ramah lingkungan. Dengan dukungan penelitian dan pengembangan yang berkelanjutan, SHC diharapkan dapat menjadi solusi utama untuk membangun infrastruktur modern yang lebih kuat, aman, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnan. (2024). Inovasi Teknologi Beton Self Compacting Concrete Terhadap Panjang Pengaliran (L-Flow) Dengan Variasi Umur Perawatan Beton. *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 2(1), 125–139. <https://doi.org/10.61132/globe.v2i1.210>
- Dwijayanti, A. J. K. J. D. A. (2024). Penerapan Kembali Limbah Plastik Sebagai Alternatif Bahan Konstruksi Jalan yang Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan. *Jurnal Reka Cipta*, 1.
- Farhan, M., Ay Lie, H., Purwanto, & Harimurti W. Hadikusumo, B. (2024). Mechanical And Physical Behavior Of Self-Healing Concrete Using Bacillus Megaterium Bacteria. *International Journal of Geomate*, 28. <https://doi.org/https://doi.org/10.21660/2025.125.4715>
- Fauziah, L., Mutiara Murhayati, S., Muhammad M, L., & Aisyah, L. (2023). RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil Pengaruh Bakteri Bacillus Megaterium sebagai Self-Healing Agent pada Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 09, 228–239. <https://doi.org/10.26760/rekaracana>
- Ghazy, A. H., Emara, M. R., Abdallah, A. M., & Attia, M. I. E. S. (2024). Innovative Strategies for Enhanced Concrete Durability: A Comparative Analysis of Autogenous and Autonomous Self-healing Mechanisms. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01426-5>
- Gumelar As'at, F., & Nuraini, R. (2020). Bakteri Bacillus Subtilis Sebagai Agen Self Healing Concrete Dengan Variasi Persentase Nilai ph. *Jurnal REKAYASA*, 10(02), 142–152.
- Hafizh, M., Muhammad Mauludin, L., Susanto, A., Widiarnoko, G., Studi Teknik Sipil, P., Negeri Bandung, P., Bandung, K., Studi Teknik Kimia, P., Bintang Solusi Bersama, P., & Jakarta Selatan, K. (2024). Kuat Tekan Self-Healing Concrete Berbasis Enkapsulasi Xanthan Gum. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 3.
- Haikal, M., Nella Asyifa, C., Budi Aulia, T., kunci, K., Mutu Tinggi, B., Staphylococcus sp, B., Tekan Beton, K., & Beton, K. (2024). Pengaruh Bakteri Staphylococcus sp. Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi pada Self-Healing Concrete. *Journal of The Civil Engineering Student*, 6, 36–42.
- Harmiyati, Syarif, F., Mildawati, R., Hasyim, N., & Iswanto. (2023). Pemanfaatan Limbah Sayur Sebagai Agen Dalam Pembuatan Beton Pulih Mandiri. *JURNAL SAINTIS*, 23(02), 35–42. [https://doi.org/10.25299/saintis.2023.vol23\(02\).11477](https://doi.org/10.25299/saintis.2023.vol23(02).11477)

- Idris, Y., Alepu, A., & Budi Aulia, T. (2024). Optimasi Kekuatan Tarik Belah Beton Mutu Tinggi Melalui Peningkatan Efektifitas Bakteri Pada Self-Healing Concrete The Improvement of the Tensile Strength of High-Strength Concrete through the Optimization of Bacteria in Self-Healing Concrete. *Jurnal Pemukiman*, 19, 107–118. <https://jurnalpermukiman.pu.go.id/index.php/JP/article/view/548>
- Kurnianingsih, I. O., Pradana, C. H. G., Rahmi, A. T., Pratiwi, K. H., & Legowo, S. J..(2022). Inovasi Penggunaan Serat Masker dan Botol Plastik Pada Campuran Beton Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknik Sipil*, 11. <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jft/article/download/16817/9642>
- Lin, X., Nguyen, Q. D., Castel, A., Li, P., Tam, V. W. Y., & Li, W. (2025). Self-healing efficiency of sustainable biochar-cement composites incorporating crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, 458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139542>
- Lirawati, Suardi, H. R., Fadhillah, R. A., Maulana, D., Susilawati, E. D., & Aqshaprayza, I. (2024). Pengaruh Limbah Puntung Rokok dalam Proses Self Healing Concrete Terhadap. *Journal Of Social Science Research*, 4, 16148–16162.
- Pohan, R. F., & R Rambe, dan M. (2022). Beton Ramah Lingkungan Dengan Cangkang Telur Sebagai Pengganti Sebagian Semen. In *dkk/METIKS* (Vol. 2, Issue 1).
- Purnamasari, E., Antonius, & Setiyawan, P. (2024). Beton Non Pasir sebagai Beton Ramah Lingkungan. *Prosiding Seminar Nasional Teknik (SENASTIKA 2024)*. <https://ojs.uniska-bjm.ac.id/index.php/PIUOK/article/download/17711/7129>
- Qureshi, T., & Al-Tabbaa, A. (2020). Self-Healing Concrete and Cementitious Materials. In *Advanced Functional Materials*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92349>
- Rahita, A. C., Zaki, A., Al-Mizan, M. F., & Rosyidi, S. A. P. (2024). Analysis of the effect of concrete repair and self-healing due to corrosion using the impact-echo method. *Archives of Civil Engineering*, 70(4), 459–476. <https://doi.org/10.24425/ace.2024.151903>
- Rochman, A., Hidayati, N., Sahid, M. N., & Ujianto, M. (2023). Utilization of Cast Plastic Waste for Paving Block with Sand Mixture. *Civil Engineering and Architecture*, 11(5), 2930–2935. <https://doi.org/10.13189/cea.2023.110809>
- Rochman, A., Ujianto, M., Nurchasanah, Y., Ernawati, S., Yani, J. A., Kartasura, P., Pos, T., & Code, S. P. (2023). Pemanfaatan Limbah Plastik Cor Sebagai Agregat Kasar Olahan Pada Beton. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2023*.
- Vishal, A., Chepuri, A., & Chandana, N. (2025). Assessment of bacteria-based self-healing concrete through experimental investigations — a sustainable approach. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00215-w>
- Wibowo, I. A., & Kristanto, L. (2025). Penggunaan Self Healing Concrete, Teknologi Masa Depan Kontruksi jalan di Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil Pertahanan*, 12(1).