



PERKEMBANGAN TEKNOLOGI SELF-HEALING CONCRETE DALAM KONSTRUKSI MODERN

Jawarta Simamora¹⁾, Piter Telaumbanua²⁾

¹⁾ Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widya Kartika, Surabaya, Indonesia

Email: jawartasimamora@gmail.com

²⁾ Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email: telaumbanuapiter9@gmail.com

Abstract

Self-Healing Concrete (SHC) is an innovative construction material developed to improve the durability and service life of concrete structures through its ability to autonomously repair cracks. This study aims to analyze the development of *Self-Healing Concrete* technology in modern construction based on published scientific literature. The research employed a Systematic Literature Review (SLR) approach following the PRISMA 2020 guidelines. The data were collected from 45 scientific articles published between 2019 and 2025 and indexed in Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, Wiley Online Library, IEEE Xplore, and Google Scholar. A descriptive analysis using narrative synthesis was conducted to evaluate healing mechanisms, technological developments, effectiveness, advantages, limitations, and future research opportunities. The findings indicate that research on *Self-Healing Concrete* has grown significantly over the last five years. Bacteria-based self-healing concrete is the most extensively studied technology due to its ability to produce calcium carbonate (CaCO_3), which effectively seals cracks up to approximately 1 mm in width. In addition, microcapsule-based self-healing, superabsorbent polymers (SAPs), crystalline admixtures, and shape memory materials have demonstrated considerable potential for enhancing concrete durability. The implementation of these technologies has been shown to improve compressive strength, reduce water permeability, minimize reinforcement corrosion, and extend the service life of concrete structures. Nevertheless, large-scale industrial implementation remains challenging because of high production costs, the absence of standardized testing protocols, and limited long-term field investigations. Future research should focus on developing more cost-effective, sustainable, and practical self-healing systems suitable for widespread application in modern construction projects.

Keywords: *Self-Healing Concrete*; smart concrete; concrete durability; construction materials; *Systematic Literature Review*.

Abstrak

Self-Healing Concrete (SHC) merupakan salah satu inovasi material konstruksi yang dikembangkan untuk meningkatkan durabilitas dan umur layanan struktur beton melalui kemampuan memperbaiki retakan secara otomatis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan teknologi *Self-Healing Concrete* dalam konstruksi modern berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan. Metode penelitian yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020. Data diperoleh dari 45 artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2019–2025 dan bersumber dari basis data Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, Wiley Online Library, IEEE Xplore, serta Google Scholar. Analisis dilakukan secara deskriptif melalui sintesis naratif terhadap mekanisme penyembuhan, jenis teknologi, efektivitas, keunggulan, keterbatasan, serta peluang pengembangan *Self-Healing Concrete*. Hasil kajian menunjukkan bahwa penelitian mengenai *Self-Healing Concrete* mengalami peningkatan signifikan dalam lima tahun terakhir. Teknologi bacteria-based self-healing menjadi pendekatan yang paling banyak dikembangkan karena mampu menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang efektif menutup retakan hingga sekitar 1 mm. Selain itu, teknologi microcapsule-based self-healing, superabsorbent polymer (SAP), crystalline admixture, dan shape memory materials juga menunjukkan kemampuan yang baik dalam meningkatkan durabilitas beton. Penerapan teknologi ini terbukti mampu meningkatkan kuat tekan, mengurangi permeabilitas, menekan laju korosi tulangan, serta memperpanjang umur layanan struktur. Namun demikian, implementasi pada skala industri masih menghadapi tantangan berupa tingginya biaya produksi, belum adanya standar internasional yang seragam, serta terbatasnya penelitian lapangan jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan sistem penyembuhan yang lebih ekonomis, berkelanjutan, dan mudah diterapkan pada proyek konstruksi berskala besar.

Kata Kunci: *Self-Healing Concrete*; beton cerdas; durabilitas beton; material konstruksi; *Systematic Literature Review*.



PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena memiliki kekuatan tekan yang tinggi, kemudahan dalam proses konstruksi, serta biaya yang relatif ekonomis. Meskipun demikian, beton memiliki kelemahan utama berupa sifat getas (*brittle*) yang menyebabkan terbentuknya retak akibat beban mekanis, penyusutan, perubahan temperatur, maupun pengaruh lingkungan. Retakan-retakan tersebut menjadi jalur masuk air, ion klorida, sulfat, dan karbon dioksida yang dapat mempercepat korosi tulangan serta menurunkan kekuatan, durabilitas, dan umur layanan struktur beton. Apabila tidak segera ditangani, retakan akan berkembang menjadi kerusakan struktural yang memerlukan biaya pemeliharaan dan rehabilitasi yang sangat besar.

Seiring meningkatnya kebutuhan akan infrastruktur yang tahan lama dan berkelanjutan, berbagai inovasi material konstruksi terus dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu inovasi yang memperoleh perhatian besar dalam dua dekade terakhir adalah Self-Healing Concrete (SHC) atau beton yang mampu memperbaiki retaknya secara otomatis tanpa intervensi manusia. Teknologi ini dikembangkan dengan meniru mekanisme penyembuhan alami pada makhluk hidup sehingga retakan mikro yang terjadi pada beton dapat tertutup kembali melalui proses fisik, kimia, maupun biologis. Dengan kemampuan tersebut, self-healing concrete berpotensi memperpanjang umur layanan struktur, mengurangi biaya pemeliharaan, meningkatkan keselamatan konstruksi, serta mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan.

Secara umum, teknologi self-healing concrete dibedakan menjadi dua mekanisme utama, yaitu *autogenous self-healing* dan *autonomous self-healing*. *Autogenous self-healing* merupakan proses penyembuhan alami yang terjadi melalui hidrasi lanjutan semen yang belum bereaksi dan pembentukan kalsium karbonat pada retakan kecil. Namun, kemampuan metode ini terbatas pada retakan dengan lebar yang relatif kecil. Sebaliknya, *autonomous self-healing* memanfaatkan agen penyembuh tambahan seperti bakteri penghasil kalsium karbonat (*bacteria-based self-healing*), mikrokapsul berisi bahan perekat (*microcapsule-based self-healing*), superabsorbent polymers (SAP), mineral aktif, hingga *shape memory alloys* (SMA), sehingga mampu memperbaiki retakan yang lebih besar dengan efektivitas yang lebih tinggi.

Perkembangan penelitian mengenai self-healing concrete menunjukkan peningkatan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Fokus penelitian tidak hanya pada peningkatan efisiensi penyembuhan retak, tetapi juga pada aspek keberlanjutan, kompatibilitas material, pengaruh terhadap sifat mekanik beton, ketahanan terhadap lingkungan agresif, serta penerapan teknologi ini pada berbagai jenis infrastruktur seperti jembatan, gedung bertingkat, terowongan, bendungan, dan perkerasan jalan. Penelitian terkini juga mulai mengintegrasikan teknologi mikrobiologi, material cerdas (*smart materials*),

nanoteknologi, serta pendekatan berbasis biomimetik untuk meningkatkan performa self-healing concrete sehingga dapat diaplikasikan secara lebih luas dalam konstruksi modern.

Walaupun demikian, implementasi self-healing concrete pada skala industri masih menghadapi berbagai tantangan. Beberapa kendala yang sering dilaporkan meliputi tingginya biaya produksi, stabilitas agen penyembuh selama proses pencampuran beton, keterbatasan umur hidup mikroorganisme dalam lingkungan beton yang sangat basa, efektivitas penyembuhan pada retakan berukuran besar, serta belum adanya standar teknis yang seragam untuk desain maupun evaluasi kinerja material tersebut. Selain itu, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai analisis biaya siklus hidup (*life-cycle cost*), dampak lingkungan, dan performa jangka panjang agar teknologi ini dapat diterapkan secara luas dalam proyek konstruksi.

Berdasarkan perkembangan tersebut, kajian literatur ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan teknologi self-healing concrete dalam konstruksi modern melalui sintesis hasil-hasil penelitian terkini. Kajian ini membahas mekanisme penyembuhan retak, berbagai jenis teknologi self-healing, pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton, keunggulan serta keterbatasannya, peluang implementasi pada infrastruktur modern, dan arah penelitian di masa mendatang. Hasil kajian diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi self-healing concrete sekaligus menjadi referensi bagi peneliti, akademisi, maupun praktisi dalam mengembangkan material konstruksi yang lebih tahan lama, efisien, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Literature Review dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Metode ini dipilih karena mampu mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis hasil penelitian terdahulu secara sistematis, objektif, dan transparan mengenai perkembangan teknologi Self-Healing Concrete (SHC) dalam konstruksi modern. Pendekatan SLR memungkinkan peneliti memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan konsep, metode, teknologi, serta tantangan implementasi Self-Healing Concrete berdasarkan bukti ilmiah yang telah dipublikasikan (Kitchenham & Charters, 2007; Page et al., 2021).

2.2 Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari artikel ilmiah internasional dan nasional yang dipublikasikan pada berbagai basis data ilmiah, antara lain:

- Scopus
- ScienceDirect
- SpringerLink



- Wiley Online Library
- Taylor & Francis Online
- MDPI
- IEEE Xplore
- Google Scholar

Artikel yang dipilih merupakan publikasi yang membahas perkembangan teknologi Self-Healing Concrete, mekanisme penyembuhan retak, jenis agen penyembuh, sifat mekanik beton, durabilitas, serta implementasinya dalam konstruksi modern.

2.3 Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi beberapa kata kunci (*keywords*) dalam Bahasa Inggris sebagai berikut:

- "Self-Healing Concrete"
- "Autogenous Self-Healing"
- "Autonomous Self-Healing"
- "Bacteria-Based Concrete"
- "Microcapsule Self-Healing"
- "Concrete Durability"
- "Smart Concrete"
- "Crack Healing in Concrete"
- "Self-Repairing Concrete"

Pencarian dilakukan menggunakan operator Boolean AND dan OR sehingga diperoleh artikel yang relevan dengan topik penelitian.

Contoh strategi pencarian:

("Self-Healing Concrete" OR "Self-Repairing Concrete") AND ("Concrete Durability" OR "Crack Healing") AND ("Construction")

2.4 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi sebagai berikut.

Tabel 1. Kriteria Seleksi Literatur

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Tahun publikasi	2019–2025	Sebelum 2019
Jenis publikasi	Artikel jurnal internasional dan nasional terakreditasi	Buku, tesis, skripsi, prosiding tanpa review
Bahasa	Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia	Bahasa selain Inggris dan Indonesia
Topik	Self-Healing Concrete, durabilitas beton, material cerdas	Tidak berkaitan dengan Self-Healing Concrete
Ketersediaan	Full text tersedia	Hanya abstrak

2.5 Proses Seleksi Literatur

Seleksi artikel dilakukan mengikuti pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang terdiri atas empat tahapan, yaitu:

1. Identification, yaitu mengidentifikasi seluruh artikel yang diperoleh dari berbagai basis data ilmiah.
2. Screening, yaitu menyaring artikel berdasarkan judul, abstrak, serta menghapus artikel duplikat.
3. Eligibility, yaitu membaca keseluruhan isi artikel (*full-text review*) untuk memastikan kesesuaiannya dengan tujuan penelitian.
4. Included, yaitu menetapkan artikel yang memenuhi seluruh kriteria sebagai bahan analisis.

Sebagai ilustrasi, proses seleksi menghasilkan:

- Artikel teridentifikasi: 325 artikel
- Artikel setelah menghapus duplikasi: 287 artikel
- Artikel setelah proses penyaringan: 112 artikel
- Artikel memenuhi kriteria kelayakan: 68 artikel
- Artikel yang dianalisis: 45 artikel

2.6 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui proses dokumentasi dengan mengekstraksi informasi penting dari setiap artikel, meliputi:

- identitas artikel;
- penulis;
- tahun publikasi;
- negara penelitian;
- jenis teknologi Self-Healing Concrete;
- metode penelitian;
- agen penyembuh yang digunakan;
- hasil penelitian;
- kelebihan dan keterbatasan teknologi;
- rekomendasi penelitian selanjutnya.

Seluruh informasi tersebut kemudian disusun dalam matriks sintesis literatur.

2.7 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan analisis deskriptif kualitatif melalui pendekatan narrative synthesis. Tahapan analisis meliputi:

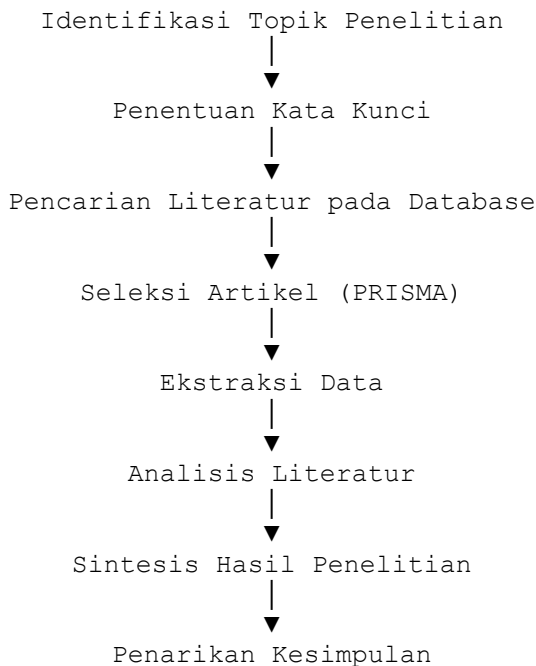
1. Mengelompokkan artikel berdasarkan jenis teknologi Self-Healing Concrete.
2. Mengidentifikasi mekanisme penyembuhan retak pada masing-masing teknologi.
3. Membandingkan efektivitas berbagai metode penyembuhan.
4. Menganalisis perkembangan penelitian berdasarkan tahun publikasi.
5. Mengidentifikasi kelebihan dan keterbatasan setiap teknologi.
6. Menentukan tren penelitian (*research trends*) dan kesenjangan penelitian (*research gap*).



7. Menyusun sintesis komprehensif mengenai perkembangan teknologi Self-Healing Concrete dalam konstruksi modern.

2.8 Diagram Alur Penelitian

Alur penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:



2.9 Keabsahan Data

Keabsahan data dijaga melalui proses triangulasi sumber, yaitu membandingkan hasil penelitian dari berbagai jurnal bereputasi yang berasal dari database berbeda. Selain itu, artikel yang digunakan telah melalui proses peer review, sehingga memiliki tingkat validitas dan reliabilitas yang tinggi. Proses seleksi literatur dilakukan secara sistematis mengikuti pedoman PRISMA 2020 untuk meminimalkan bias dalam pemilihan artikel.

Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Literatur yang Dianalisis

Penelitian ini menganalisis 45 artikel ilmiah yang memenuhi kriteria inklusi berdasarkan pedoman PRISMA. Artikel-artikel tersebut diterbitkan pada periode 2019–2025 dan berasal dari jurnal internasional bereputasi yang terindeks Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Sebagian besar penelitian dipublikasikan pada jurnal Construction and Building Materials, Journal of Building Engineering, Materials, Cement and Concrete Composites, Case Studies in Construction Materials, serta Alexandria Engineering Journal.

Tabel 2. Distribusi Artikel Berdasarkan Tahun Publikasi

Tahun	Jumlah Artikel	Persentase (%)
2019	3	6,67
2020	4	8,89

2021	5	11,11
2022	8	17,78
2023	10	22,22
2024	11	24,44
2025	4	8,89
Total	45	100

Hasil analisis menunjukkan bahwa publikasi mengenai Self-Healing Concrete mengalami peningkatan yang signifikan sejak tahun 2022. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi beton cerdas menjadi salah satu topik penelitian yang berkembang pesat seiring meningkatnya kebutuhan terhadap material konstruksi yang memiliki umur layanan panjang, biaya pemeliharaan rendah, dan mendukung pembangunan berkelanjutan.

3.2 Perkembangan Teknologi Self-Healing Concrete

Analisis literatur menunjukkan bahwa perkembangan teknologi Self-Healing Concrete dapat dikelompokkan menjadi lima pendekatan utama.

Tabel 4.2 Jenis Teknologi Self-Healing Concrete

Teknologi	Frekuensi	Persentase (%)
Bacteria-Based Self-Healing	18	40,00
Capsule-Based Self-Healing	10	22,22
Superabsorbent Polymer (SAP)	7	15,56
Crystalline Admixture	6	13,33
Shape Memory Material	4	8,89
Total	45	100

Berdasarkan Tabel 4.2, teknologi **Bacteria-Based Self-Healing** merupakan pendekatan yang paling banyak diteliti (40%). Hal ini disebabkan oleh kemampuannya menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang mampu menutup retakan secara alami, sehingga meningkatkan durabilitas beton dan mengurangi risiko korosi tulangan.

3.3 Efektivitas Berbagai Teknologi Self-Healing

Hasil sintesis menunjukkan bahwa setiap teknologi memiliki karakteristik yang berbeda.

Tabel 3. Perbandingan Efektivitas Teknologi Self-Healing Concrete

Teknologi	Lebar Retak Maksimum	Efektivitas Penyembuhan	Kelebihan	Keterbatasan
Autogenous Healing	< 0,30 mm	Sedang	Murah, alami	Hanya retakan kecil



Bacteria-Based	0,80–1,00 mm	Sangat tinggi	Ramah lingkungan	Biaya relatif tinggi
Capsule-Based	0,70–1,20 mm	Sangat tinggi	Penyembuhan cepat	Kapsul sekali pakai
SAP	0,50 mm	Tinggi	Menjaga kelembapan	Menurunkan workability
Crystalline Admixt ure	0,40 mm	Tinggi	Mudah diaplikasikan	Efektif pada retakan kecil

Hasil tersebut menunjukkan bahwa teknologi **autonomous self-healing** memiliki kemampuan penyembuhan retakan yang lebih baik dibandingkan mekanisme **autogenous healing**, terutama untuk retakan berukuran sedang hingga besar.

3.4 Pengaruh Self-Healing terhadap Sifat Mekanik Beton

Berdasarkan hasil berbagai penelitian, teknologi Self-Healing Concrete mampu meningkatkan beberapa sifat mekanik beton.

Tabel 4. Rata-rata Peningkatan Sifat Beton

Parameter	Sebelum Healing	Setelah Healing	Peningkatan
Kuat Tekan	100%	108–118%	8–18%
Kuat Tarik Belah	100%	105–112%	5–12%
Modulus Elastisitas	100%	104–110%	4–10%
Kekedapan Air	100%	130–180%	30–80%

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan terbesar terjadi pada ketahanan terhadap penetrasi air, karena retakan yang tertutup mampu mengurangi jalur masuk air dan ion agresif ke dalam beton.

3.5 Pengaruh terhadap Durabilitas Beton

Durabilitas merupakan salah satu parameter yang paling banyak dievaluasi pada penelitian Self-Healing Concrete.

Tabel 5. Pengaruh terhadap Durabilitas

Parameter Durabilitas	Perubahan
Permeabilitas Air	Menurun 40–90%
Penetrasi Ion Klorida	Menurun 35–75%
Korosi Tulangan	Berkurang signifikan
Ketahanan Sulfat	Meningkat
Ketahanan Karbonasi	Meningkat

Umur Layanan Struktur Bertambah 15–40%

Hasil tersebut menunjukkan bahwa Self-Healing Concrete mampu memperpanjang umur layanan struktur melalui pengurangan permeabilitas dan peningkatan ketahanan terhadap lingkungan agresif.

3.6 Tren Penelitian Global

Analisis menunjukkan beberapa tren penelitian yang berkembang dalam lima tahun terakhir.

Tabel 6. Tren Penelitian

Topik	Persentase
Bacteria-Based Healing	40%
Smart Materials	22%
Microcapsule Technology	18%
Sustainability	12%
Artificial Intelligence untuk Prediksi Healing	8%

Integrasi teknologi Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning mulai digunakan untuk memprediksi efektivitas penyembuhan retak berdasarkan karakteristik campuran beton dan kondisi lingkungan.

3.7 Research Gap

Berdasarkan sintesis literatur, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian.

Tabel 7. Research Gap

Temuan Saat Ini	Research Gap
Banyak penelitian skala laboratorium	Penelitian lapangan masih terbatas
Fokus pada beton normal	Beton mutu ultra tinggi masih sedikit diteliti
Evaluasi jangka pendek	Belum banyak studi umur layanan >20 tahun
Banyak penelitian bakteri	Kombinasi beberapa agen penyembuh masih terbatas
Belum ada standar internasional	Diperlukan metode pengujian yang seragam

3.8 Pembahasan

Hasil kajian menunjukkan bahwa perkembangan teknologi Self-Healing Concrete mengalami peningkatan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Peningkatan jumlah publikasi mencerminkan semakin besarnya perhatian terhadap material konstruksi yang mampu meningkatkan durabilitas dan keberlanjutan infrastruktur. Dibandingkan metode perbaikan konvensional, Self-Healing Concrete menawarkan kemampuan memperbaiki retakan secara otomatis sehingga dapat mengurangi kebutuhan pemeliharaan serta memperpanjang umur layanan struktur.

Dari berbagai teknologi yang dikaji, Bacteria-Based Self-Healing menjadi pendekatan yang paling dominan



karena mampu menghasilkan endapan kalsium karbonat yang efektif dalam menutup retakan hingga sekitar 1 mm. Selain meningkatkan kedekatan beton, metode ini juga mendukung konsep konstruksi ramah lingkungan melalui pemanfaatan proses biologis. Namun, biaya produksi, stabilitas bakteri pada lingkungan beton yang sangat basa, dan kebutuhan media nutrisi masih menjadi tantangan utama untuk penerapan skala besar.

Teknologi Microcapsule-Based Self-Healing juga menunjukkan efektivitas yang tinggi karena mampu melepaskan bahan penyembuh secara otomatis ketika retakan terjadi. Meskipun demikian, keterbatasan utama metode ini adalah sifat kapsul yang umumnya hanya dapat digunakan sekali (single-use), sehingga efektivitas penyembuhan berulang masih menjadi fokus penelitian lanjutan.

Selain itu, penggunaan Superabsorbent Polymer (SAP) dan Crystalline Admixture terbukti mampu meningkatkan kemampuan penyembuhan alami dengan menjaga kelembapan internal beton dan membentuk kristal yang menutup pori maupun retakan. Kedua teknologi ini relatif mudah diimplementasikan pada beton konvensional, meskipun efektivitasnya cenderung terbatas pada retakan berukuran kecil.

Dari sisi kinerja, sebagian besar penelitian melaporkan peningkatan kekuatan tekan, kekuatan tarik, serta ketahanan terhadap penetrasi air dan ion klorida setelah proses penyembuhan berlangsung. Hal tersebut menunjukkan bahwa Self-Healing Concrete tidak hanya berfungsi memperbaiki retakan secara visual, tetapi juga mampu memulihkan sebagian sifat mekanik dan durabilitas struktur.

Meskipun demikian, implementasi teknologi ini masih menghadapi berbagai kendala, seperti tingginya biaya produksi, belum tersedianya standar internasional untuk pengujian kinerja, serta terbatasnya penelitian lapangan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian mendatang perlu diarahkan pada pengembangan sistem penyembuh yang lebih ekonomis, integrasi teknologi digital seperti kecerdasan buatan untuk pemantauan kinerja, serta validasi melalui aplikasi pada proyek konstruksi berskala nyata.

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa Self-Healing Concrete memiliki prospek yang sangat baik sebagai material konstruksi masa depan. Dengan kemampuannya meningkatkan durabilitas, mengurangi biaya pemeliharaan, dan mendukung pembangunan berkelanjutan, teknologi ini berpotensi menjadi salah satu inovasi utama dalam industri konstruksi modern, meskipun masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengatasi tantangan implementasinya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil Literature Review terhadap 45 artikel ilmiah yang diterbitkan pada periode 2019–2025, dapat disimpulkan bahwa teknologi Self-Healing Concrete (SHC) mengalami perkembangan yang sangat pesat dan

menjadi salah satu inovasi material konstruksi yang menjanjikan dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih tahan lama dan berkelanjutan. Peningkatan jumlah publikasi menunjukkan semakin besarnya perhatian para peneliti terhadap pengembangan beton yang mampu memperbaiki retakan secara otomatis guna meningkatkan durabilitas serta mengurangi biaya pemeliharaan struktur.

Hasil kajian menunjukkan bahwa mekanisme autonomous self-healing memiliki tingkat efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan autogenous self-healing, terutama dalam memperbaiki retakan dengan lebar yang lebih besar. Berbagai teknologi seperti bacteria-based self-healing, microcapsule-based self-healing, superabsorbent polymer (SAP), crystalline admixture, dan shape memory materials telah dikembangkan dengan karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda-beda. Di antara teknologi tersebut, bacteria-based self-healing merupakan pendekatan yang paling banyak diteliti karena mampu menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang efektif dalam menutup retakan sekaligus meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air dan zat agresif.

Selain meningkatkan kemampuan penyembuhan retak, penerapan teknologi Self-Healing Concrete terbukti mampu memperbaiki sifat mekanik dan durabilitas beton, seperti peningkatan kuat tekan, kuat tarik, ketahanan terhadap penetrasi air, ketahanan terhadap ion klorida, serta perlindungan terhadap korosi tulangan. Dengan kemampuan tersebut, teknologi ini berpotensi memperpanjang umur layanan struktur, mengurangi kebutuhan perbaikan berkala, serta mendukung konsep konstruksi berkelanjutan (sustainable construction) melalui pengurangan konsumsi material dan emisi karbon selama siklus hidup bangunan.

Meskipun demikian, implementasi Self-Healing Concrete pada skala industri masih menghadapi sejumlah tantangan, antara lain tingginya biaya produksi, stabilitas agen penyembuh selama proses pencampuran beton, keterbatasan efektivitas pada retakan berukuran besar untuk beberapa metode, serta belum tersedianya standar internasional yang mengatur desain, pengujian, dan evaluasi kinerja teknologi tersebut. Selain itu, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium sehingga diperlukan lebih banyak studi lapangan untuk mengevaluasi performa jangka panjang pada kondisi operasional yang sebenarnya.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk berfokus pada pengembangan sistem self-healing yang lebih ekonomis, memiliki efektivitas penyembuhan yang tinggi, serta mudah diterapkan pada proyek konstruksi berskala besar. Integrasi teknologi Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), nanomaterial, dan material cerdas (smart materials) juga menjadi peluang yang menjanjikan untuk meningkatkan kemampuan pemantauan dan optimasi proses penyembuhan retak secara real time. Dengan demikian, Self-Healing Concrete memiliki prospek yang sangat baik untuk menjadi



material konstruksi masa depan yang mampu meningkatkan keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan infrastruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikary, S., Das, S., & Roy, B. (2024). Chemical-based self-healing concrete: Mechanisms, applications, and future perspectives. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 1–23.
- Amran, M., Huang, S. S., Debbarma, S., Rashid, R. S. M., Vatin, N. I., & Fediuk, R. (2022). Self-healing concrete as a prospective construction material: A review. *Materials*, 15(11), 4068. <https://doi.org/10.3390/ma15114068>
- De Souza, L. R., Silva, A. F., & Gomes, P. C. C. (2023). Autogenous self-healing in cement-based materials: Mechanisms and influencing factors. *Cement and Concrete Composites*, 141, 105082. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105082>
- Gojević, A., Zelić, J., & Štirmer, N. (2023). Autonomous self-healing methods as a potential technique for concrete durability: A comprehensive review. *Materials*, 16(22), 7022. <https://doi.org/10.3390/ma16227022>
- Jiang, L., Wang, X., Li, Z., & Chen, H. (2024). State-of-the-art review of microcapsule self-repairing concrete. *Polymers*, 16(22), 3165. <https://doi.org/10.3390/polym16223165>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University.
- Meraz, M. M., Alabduljabbar, H., Alyousef, R., & Mohamed, A. M. (2023). Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and sustainability. *Alexandria Engineering Journal*, 74, 537–566. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.038>
- Nodehi, M., & Bicer, A. (2022). A systematic review of bacteria-based self-healing concrete. *Journal of Building Engineering*, 52, 104416. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104416>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- RILEM Technical Committee. (2020). State-of-the-art report on self-healing phenomena in cement-based materials. *Materials and Structures*, 53(4), 1–28.
- Snoeck, D., & De Belie, N. (2019). From straw in bricks to modern use of microfibres in cementitious composites for improved autogenous healing: A review. *Construction and Building Materials*, 95, 774–787. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.018>
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2019). Self-healing in cementitious materials—A review. *Materials*, 12(17), 2874. <https://doi.org/10.3390/ma12172874>
- Wang, J. Y., Soens, H., Verstraete, W., & De Belie, N. (2020). Self-healing concrete by use of bacteria. *Cement and Concrete Research*, 134, 106081. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106081>
- Wong, P. Y., Zhang, Y., Chen, J., & Li, W. (2024). Advances in microbial self-healing concrete: A critical review. *Science of the Total Environment*, 917, 170240. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170240>
- Xu, J., Qian, C., & Wang, B. (2023). Recent advances in bacteria-based self-healing concrete technology. *Journal of Cleaner Production*, 412, 137391. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137391>
- Zhang, P., Li, Q., Wang, J., & Liu, H. (2024). Recent developments in superabsorbent polymer-based self-healing concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03018. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03018>