

PENGGUNAAN *SELF HEALING CONCRETE*, TEKNOLOGI MASA DEPAN KONSTRUKSI JALAN DI INDONESIA

Irawan Agung Wibowo¹, Luluk Kristanto²

Program Studi Teknik Sipil Pertahanan Kordos, Akademi Militer, Jawa Tengah
wibowoagungirawan@gmail.com¹⁾

Program Studi Teknik Sipil Pertahanan Kordos, Akademi Militer, Jawa Tengah
mrluke.z.051@gmail.com²⁾

ABSTRAK

Self Healing Concrete merupakan inovasi beton modern yang mampu memperbaiki retakan secara mandiri. Teknologi ini menjanjikan peningkatan daya tahan dan pengurangan biaya pemeliharaan infrastruktur jalan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peluang dan tantangan penggunaan *Self Healing Concrete* sebagai teknologi masa depan konstruksi jalan di Indonesia.. Metodologi penelitian yang digunakan adalah kualitatif dengan pendekatan studi literatur. Hasil yang diharapkan adalah identifikasi peluang *Self Healing Concrete* seperti peningkatan efisiensi infrastruktur, mendukung keberlanjutan lingkungan, adaptasi dengan iklim indonesia, dukungan *stakeholder*, kolaborasi dengan institusi penelitian, efisiensi biaya jangka panjang, serta tantangan yang meliputi biaya awal yang tinggi, keterbatasan teknologi, kondisi logistik dan infrastruktur, kurangnya pengetahuan dan sumber daya manusia, regulasi dan standar, resistensi terhadap perubahan.

Kata kunci: *konstruksi jalan; penggunaan; self healing concrete; teknologi*

ABSTRACT

Self-Healing Concrete is an innovative modern concrete capable of repairing cracks autonomously. This technology promises improved durability and reduced maintenance costs for road infrastructure. This study aims to analyze the opportunities and challenges of using Self-Healing Concrete as a future technology for road construction in Indonesia. The research methodology employed is qualitative with a literature study approach. The expected outcomes include identifying opportunities for Self-Healing Concrete, such as improving infrastructure efficiency, supporting environmental sustainability, adapting to Indonesia's climate, stakeholder support, collaboration with research institutions, long-term cost efficiency, as well as challenges such as high initial costs, technological limitations, logistical and infrastructure conditions, lack of knowledge and human resources, regulations and standards, and resistance to change.

Keywords: *road construction; self healing concrete; technology; utilization*

PENDAHULUAN

Jalan merupakan elemen vital dalam mendukung aktivitas ekonomi dan mobilitas masyarakat di Indonesia. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan yang dimaksud Jalan adalah seluruh bagian Jalan, termasuk

bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi Lalu Lintas umum, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan rel dan jalan kabel. Kebanyakan konstruksi jalan yang digunakan adalah konstruksi jalan

aspal dan jalan beton. Jalan aspal atau *flexible pavement*, adalah konstruksi jalan yang menggunakan bahan pengikat aspal panas dengan unsur utama bitumen yang diperoleh dari residu hasil pengilangan minyak bumi dan berfungsi sebagai pengikat agregat dalam pembuatan jalan. Sedangkan Jalan Beton atau *rigid pavement* adalah menerapkan sistem perkerasan kaku yang terdiri atas lapis pondasi dan lapis pondasi bawah. Karena memiliki modulus elastisitas yang tinggi, perkerasan beton akan meneruskan beban ke bidang tanah dasar yang luas dengan komposisinya terdiri dari plat (*slab*) beton semen sebagai lapis pondasi dan lapis pondasi bawah di atas tanah dasar. Dari kedua konstruksi tersebut, sesuai penelitian dari Abdulloh Farid (2013), didapat bahwa biaya perkerasan beton (*rigid pavement*) lebih murah dari perkerasan aspal (*flexible pavement*).

Data Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT) Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) (2024) menyebutkan sejak tahun 1978 hingga pertengahan Januari 2024, Indonesia sudah memiliki 2.893,02 kilometer jalan tol yang tersebar di lima pulau besar seperti **Tabel 1** di bawah.

Tabel 1. Total Panjang Jalan Tol di Indonesia

No	Pulau	Panjang (km)
1	Jawa	1.782,47
2	Sumatera	941,75
3	Kalimantan	97,27
4	Sulawesi	61,46
5	Bali	10,07
Jumlah		2.893,02

(BPJT PUPR, 2024)

Panjang jalan Tol tersebut masih akan bertambah sesuai Surat Edaran Dirjen Bina Marga No 16/SE/Db/2020 bahwa sampai dengan tahun 2050 panjang jalan tol yang tersebar di seluruh di seluruh Indonesia akan mencapai 18.000 km. Pembangunan jalan tol yang ambisius tersebut tentunya sebagian besar akan menggunakan konstruksi beton karena pertimbangan biaya yang lebih murah.

Penggunaan campuran beton tersebut mempunyai kelemahan tersendiri khususnya ketahanannya yang rendah terhadap retak mikro atau makro serta korosi pada tulangnya sebagai akibat dari masuknya air dari retak yang terjadi pada beton tersebut (**Gambar 1**). Selain itu, biaya perawatan beton yang cukup mahal dan dianggap tidak ekonomis. Walaupun *microcrack* tidak mengurangi kekuatan beton, akan tetapi apabila tidak ditangani secara serius maka akan mengurangi umur teknis infrastruktur serta meningkatkan risiko keselamatan pengguna jalan. Oleh karenanya, diperlukan inovasi teknologi beton, agar konstruksi beton dimasa yang akan datang lebih ramah lingkungan serta berkelanjutan.



Gambar 1. Retakan pada Jalan (Olahan Penulis, 2024)

Teknologi *Self Healing Concrete* memberikan solusi inovatif dalam mengatasi permasalahan ini, karena memiliki kemampuan untuk memperbaiki retakan secara mandiri dengan menggunakan mikroorganisme atau senyawa kimia tertentu yang bereaksi saat terjadi kerusakan. Teknologi ini telah menunjukkan hasil yang positif di berbagai negara dalam mengurangi kebutuhan perbaikan manual dan meningkatkan daya tahan jalan.

Namun, penggunaan *Self Healing Concrete* sebagai teknologi konstruksi jalan di Indonesia tidak terlepas dari berbagai tantangan, seperti biaya produksi yang relatif tinggi, keterbatasan pengetahuan tentang teknologi ini, serta kondisi logistik yang kompleks. Penelitian ini penting dilakukan untuk mengidentifikasi peluang dan tantangan implementasi *Self Healing Concrete*, serta memberikan rekomendasi strategis bagi pengembangan teknologi ini pada infrastruktur jalan di Indonesia.

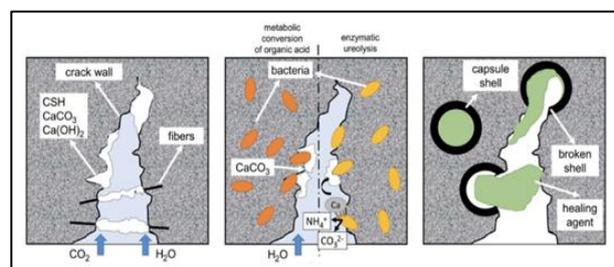
METODE

Penulisan ini menggunakan metode kualitatif dengan teknik pengumpulan data dilakukan secara dokumentasi atau studi literatur baik melalui buku, media elektronik serta sosial media yang disesuaikan dengan tema penelitian. Penelitian ini menitikberatkan pada kondisi obyek yang alamiah, dimana peneliti adalah sebagai instrumen kunci, data yang diperoleh cenderung data kualitatif, analisis data bersifat kualitatif, dan hasil penelitian dapat berupa temuan potensi atau masalah serta proses.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknologi Self-Healing Concrete

Self-Healing Concrete adalah jenis beton inovatif yang memiliki kemampuan memperbaiki keretakan secara otomatis. Menurut van der Zwaag (2008), mekanisme penyembuhan ini dapat terjadi melalui reaksi kimia, penggunaan mikroorganisme, atau bahan tambahan kapsul. Penelitian ini menekankan potensi *Self Healing Concrete* dalam memperpanjang umur infrastruktur dengan mengurangi kebutuhan perawatan manual. Mekanisme kimiawi sering kali melibatkan senyawa berbasis kalsium karbonat yang bereaksi dengan kelembapan untuk mengisi retakan. Sedangkan Zhang, et al. (2008) menjelaskan *Self Healing Concrete* pada dasarnya adalah kemampuan dari beton untuk dapat menutup retak baik tanpa adanya intervensi dari manusia. Jika retak beton kurang dari 30 μm maka retak tersebut dikategorikan sebagai retak mikro sedangkan jika retakan lebih dari itu, maka dikategorikan sebagai retak makro.



Gambar 2. Proses *Self Healing Concrete* pada Beton (Ayteki et al., 2023)

Pada **Gambar 2** dijelaskan proses *Self Healing Concrete* bekerja dengan didasarkan pada beberapa teknologi. Menurut AW Rahayu

(2024) beberapa teknologi tersebut yaitu:

a. Kapsul Mikro.

Campuran *Self Healing Concrete* ini terdiri dari bahan penyembuh seperti *Bacillus* atau *Sporosacin* serta bahan kimia aktif. Saat terjadi retakan maka kapsul akan pecah dan bakteri *autotrof* akan diaktifkan. Beton akan menyerap senyawa organik CO₂ yang ada dalam retakan dan menghasilkan CaCO₃ melalui reaksi kimia. Apabila celah sudah terisi maka bakteri akan kembali pada fase dominansi dan akan aktif kembali jika terjadi retakan baru.

Keunggulan teknologi ini adalah mengurangi dampak pemanasan global, karena mikroba yang ada dalam formulasi tersebut mampu menyerap gas CO₂ yang ada di atmosfer. Namun perlu diingat bahwa sifat mikroba adalah menyesuaikan dengan lingkungan sehingga mikroba yang berasal dari negara lain belum tentu dapat bekerja dengan baik di Indonesia.

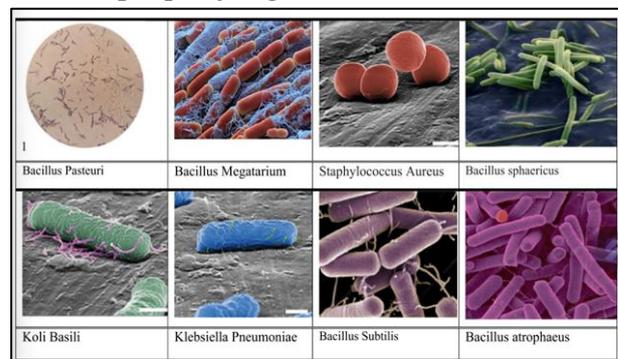
b. Serat Polimer.

Teknologi serat polimer sintetis ditambahkan ke dalam campuran beton selama pengecoran sehingga serat-serat menyebar di seluruh beton. Jika beton mengalami tekanan dan muncul retakan maka serat polimer berperan sebagai jaring internal. Serat itu akan menahan dan mencegah pelebaran retakan.

c. Nanoteknologi.

Negara-negara maju seperti China, India, Jepang dan Korea Selatan telah mengembangkan penerapan nanoteknologi dalam campuran beton. Nanoteknologi ini berukuran sangat kecil bahkan jauh lebih kecil dari butiran pasir. Partikel ini terdiri dari *silika* atau *kalsium karbonat* yang bereaksi ketika terjadi

retakan pada permukaan beton. Bahan ini membantu mengembalikan integrasi struktur beton yang rusak dengan memulai reaksi kimia di dalamnya. kalsium karbonat akan bereaksi dengan CO₂ membentuk *kalsium karbonat* padat. Penggunaan nanopartikel tersebut cukup dicampur dengan adonan beton secara merata, sehingga *Self Healing Concrete* menjadi lebih tahan terhadap keretakan dan perubahan cuaca yang berakibat memperpanjang umur beton.



Gambar 3. *Healing Agent* (Khushnood, et all, 2022)

Pada **Gambar 3** dapat dijelaskan beberapa bakteri yang dapat digunakan didalam proses pengendapan CaCO₃ dapat berupa bakteri yang aerobik maupun anaerobik. Bakteri aerobik adalah bakteri yang membutuhkan oksigen untuk dapat tumbuh, sedangkan bakteri *anaerobik* adalah bakteri yang tidak membutuhkan oksigen untuk tumbuh. Sejauh ini, penggunaan *healing agent* ini dapat meningkatkan kuat tekan beton hingga 25-30% (Mohanadoss, 2015). Beberapa contoh bakteri *anaerobik* yang dapat digunakan adalah bakteri *Pseudomonas*, *Thiobacillus*, *Denitrobacillus*, *Alcaligenes*, *Micrococcus*, and *Diaphorobacter* (Seifan, et al., 2016). Bakteri *Bacillus sporasarcina pasteurii*, *Bacillus*

sphaericus, *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus cohnii*, *Bacillus pseudofirmus*, *Bacillus halodurans*, dan *Bacillus massiliensis* adalah contoh bakteri aerobik yang digunakan didalam campuran *self healing concrete* yang memberikan hasil yang cukup baik.

Peluang Penerapan Teknologi Self Healing Concrete

Peluang penerapan *self healing concrete* dalam konstruksi jalan di Indonesia cukup menjanjikan. Hal ini terkait dengan kebutuhan infrastruktur yang tahan lama dan minim pemeliharaan. Beberapa peluang yang dapat diidentifikasi yaitu:

a. Peningkatan Efisiensi Infrastruktur.

Menurut Kurohman (2023) Penerapan *Healing Agent* pada beton dapat memberikan hasil penutupan beton yang bervariasi tergantung dari konsentrasi bakteri yang digunakan kedalam campuran beton dan juga *Nutrient Medium* yang diterapkan pada bakteri tersebut. Sebagai contoh Bakteri dari jenis *Bacillus pasteurii* yang digunakan sebagai *healing agent* memberikan perbaikan terhadap kuat tekan beton sebanyak 45% sedangkan penggunaan *Bacillus Pasteuri* dalam *Nutrient Medium Calcium Lactate* memberikan hasil yang cukup baik yaitu penurunan *corrosion rate* sebesar 0.05 mm per tahunnya.

Selain itu, penggunaan jenis bakteri *Bacillus Cohnii* dengan konsentrasi 108 CFU/ml pada beton dilaporkan dapat menutup retak selebar 0.5 mm dan penggunaan bakteri *bacillus subtilis* dalam campuran beton juga mampu

menutup retak dengan rentan sebesar 0.4 hingga 0.6 mm.

b. Mendukung Keberlanjutan Lingkungan.

Terkait pembangunan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, Kementerian PUPR telah menerbitkan Peraturan Menteri No 9 Tahun 2021 tentang konstruksi yang berkelanjutan (*Sustainable Construction*). Salah satu prinsip didalam konstruksi yang berkelanjutan adalah penggunaan material konstruksi yang berkonsep teknologi dan inovasi hijau (*Green Technology*) sehingga diharapkan dapat terus menurunkan efek buruk dari gas rumah kaca.

Dengan mengurangi kebutuhan material baru untuk perbaikan, *Self Healing Concrete* mendukung pengurangan emisi karbon dalam proses konstruksi. Penelitian oleh Jonkers (2010) menunjukkan bahwa aplikasi *Self Healing Concrete* dapat mengurangi jejak karbon hingga 30% dibandingkan beton konvensional.

Huwaida et all (2023) menyatakan bahwa optimalisasi *Self Healing Concrete* dengan Penambahan *Lignin* dan *Fly Ash* sebagai substitusi Semen dapat mendukung bahan berkelanjutan karena *fly ash* yang didapat dari limbah dan *lignin* yang lebih ramah lingkungan.

c. Adaptasi dengan iklim Indonesia.

Iklim tropis *Self Healing Concrete* 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 oleh Sangadji et al. (2017) menunjukkan bahwa formula *Self Healing Concrete* dapat disesuaikan untuk lingkungan Indonesia.

d. Dukungan *stakeholder*.

Adanya Undang-Undang No. 2 Tahun 2017 Tentang Jasa Konstruksi berperan penting dalam mendukung berbagai bidang pembangunan, termasuk mendorong peran serta teknologi dalam Percepatan Pembangunan Infrastruktur, memungkinkan penggunaan teknologi pada seluruh aspek pembangunan infrastruktur mulai dari pengkajian, perencanaan, pembiayaan, proses perancangan, pengadaan, pelaksanaan konstruksi, sampai dengan pemeliharaan infrastrukturnya.

Kebijakan pemerintah tersebut dapat menjadi pendorong adopsi teknologi baru seperti *Self Healing Concrete*. Dukungan kebijakan untuk teknologi ramah lingkungan juga dapat mempercepat implementasinya. Penggunaan *Self Healing Concrete* memungkinkan integrasi dengan sensor untuk memantau kondisi jalan secara *real-time*, memperkuat pengambilan keputusan berbasis data.

e. Kolaborasi dengan Institusi Penelitian.

Peluang untuk bekerja sama dengan universitas dan lembaga penelitian membuka jalan untuk pengembangan formula *Self Healing Concrete* yang sesuai dengan kebutuhan Indonesia. Seperti penelitian Januari Jaya Ekaputri, et. all bersama PT. Solusi Bangun Indonesia (2020) dengan judul *Artificial Geopolymer Aggregate-Bio Concrete* dari Mikroba Terkapsulasi dalam Limbah B3 PLTU sebagai Penyembuh Retak (*Self Healing*) pada Beton. Penelitian ini menyimpulkan bahwa (1) Komposisi optimum penutupan celah retak adalah beton dengan campuran agregat buatan OPC-*fly ash* dan PCC-*bentonit-slag* sebagai *binder*. Variasi tersebut memiliki kemampuan penyembuhan yang sangat baik jika dibandingkan dengan campuran lainnya. (2) Penggunaan campuran *mikroba*, *bentonite* dan *slag* sangat berpengaruh terhadap proses penyembuhan luasan dan kedalaman retak. Hasil rasio penyembuhan luasan campuran tersebut sebesar 97% dan rasio penyembuhan kedalaman retak sebesar 70%. Mekanisme penyembuhan terjadi karena terbentuknya calcite sebagai material pentup celah retak.

Begitu juga dengan penelitian Putri Rahmasanti dan Agus Kurniawan (2017) dengan judul Perbaikan Non Struktural Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*) Dengan Menggunakan Perkembangan *Bakteri Bacillus Subtilis* Dan *Bakteri Bacillus Cereus* Sebagai *Agen Self Healing Concrete* Dengan Variasi Nilai PH. Penelitian ini menyimpulkan menunjukkan bahwa kondisi sekitar beton yang memiliki pH asam (pH

2,3,4) dan pH basa (pH 10,11,12) tidak mempengaruhi perkembangbiakan bakteri *Bacillus subtilis* dan *Bacillus cereus*. Perkembangbiakan bakteri *Bacillus subtilis* secara optimal dengan perlakuan pH 12 dan perkembangbiakan bakteri *Bacillus cereus* secara optimal dengan perlakuan pH 10 dan pH 12.

f. Efisiensi Biaya Jangka Panjang. *Self Healing Concrete* dapat mengurangi kebutuhan perawatan dan perbaikan manual, sehingga menghemat biaya operasional. Tittelboom et al. (2012) menunjukkan penghematan signifikan dalam aplikasi jangka panjang di infrastruktur jalan.

Begitu pula penelitian Puput Risdanareni (2024) yang menyatakan teknologi beton canggih *Self Healing Concrete* solusi untuk memperpanjang umur pakai beton sekaligus menekan biaya perawatan yang umumnya mahal. Hal ini karena LWA berbasis *Fly Ash* memberikan perlindungan yang memadai bagi bakteri untuk menyembuhkan retakan hingga usia beton 90 hari. Selain itu, penggunaan 30% LWA dalam campuran beton menghasilkan performa penyembuhan yang baik, meskipun masih terdapat beberapa kendala seperti ekspansi yang berlebihan pada beberapa sampel.

Inovasi ini menunjukkan bahwa *Fly Ash-based Alkali Activated Lightweight Aggregate* dapat menggantikan agregat halus komersial dalam produksi beton, sekaligus mendukung proses penyembuhan retakan. Hal ini memberikan peluang baru bagi pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan, dengan

memanfaatkan limbah industri, selaras dengan *Sustainable Development Goals*, khususnya pada tujuan ke-9 terkait industri, inovasi, dan infrastruktur.

Tantangan Implementasi Teknologi Self-Healing Concrete

Tantangan utama implementasi *Self Healing Concrete* dalam konstruksi jalan di Indonesia mencakup aspek ekonomi, teknis, dan institusional sebagai berikut:

a. Biaya Awal yang Tinggi.

Pembuatan *Self Healing Concrete* memerlukan bahan khusus seperti *mikroorganisme* atau kapsul kimia yang menambah biaya produksi. Penelitian oleh Tittelboom et al. (2016) menunjukkan bahwa biaya awal *Self Healing Concrete* dapat mencapai dua kali lipat beton konvensional, yang menjadi tantangan dalam penerapan skala besar.

b. Keterbatasan Teknologi.

Teknologi masih menghadapi keterbatasan dalam hal penelitian dan pengembangan teknologi *Self Healing Concrete*. Fasilitas produksi bahan baku seperti kapsul self-healing belum tersedia, sehingga memerlukan impor yang meningkatkan biaya.

Hal ini diperkuat dengan pendapat Kurohman (2023) Penelitian dan penerapan *Self Healing Concrete* di Indonesia pada *practical engineering* masih sangat sedikit, sehingga membuat teknologi yang ditemukan juga terbatas.

c. Kondisi Logistik dan Infrastruktur.

Indonesia dengan komposisi 16.771 lebih pulaunya dikenal luas sebagai salah satu "Negara

Kepulauan" terbesar di dunia. (Triatmojo, et all, 2022) membuat distribusi material konstruksi ke daerah terpencil di Indonesia sering kali terhambat oleh infrastruktur logistik yang kurang memadai. Hal ini berdampak pada biaya dan waktu implementasi teknologi baru seperti *Self Healing Concrete*.

d. Kurangnya Pengetahuan dan Sumber Daya Manusia.

Pengetahuan tentang *Self Healing Concrete* masih minim di kalangan profesional konstruksi Indonesia. Penelitian yang dilakukan masih bersifat akademis yang belum menjangkau kebutuhan industri yang ada sehingga tidak dapat diaplikasikan di lapangan.

Menurut Kurohman (2023) Penelitian dan penerapan *Self Healing Concrete* terhambat oleh langkanya tenaga ahli yang fokus mendalami bidang ini di Indonesia, menjadikan tantangan tersendiri bagi pengembangan teknologi yang dapat menjadi solusi nyata terhadap penyediaan beton yang lebih ramah lingkungan di masa yang akan datang.

e. Regulasi dan Standar.

Ketiadaan standar nasional terkait *Self Healing Concrete* menjadi hambatan dalam memastikan kualitas dan keamanannya. Penelitian oleh Sangadji et al. (2017) menyoroti pentingnya pengembangan regulasi khusus untuk mendukung penerapan *Self Healing Concrete* pada konstruksi jalan di Indonesia.

f. Resistensi terhadap Perubahan.

Industri konstruksi cenderung konservatif dalam menerapkan teknologi baru karena risiko yang terkait dengan kegagalan implementasi konstruksi di lapangan. Para pelaku konstruksi lebih memilih

menggunakan teknologi yang sudah *familier* dan berbiaya awal murah. Mereka tidak memikirkan biaya pemeliharaan karena beranggapan bahwa pemeliharaan menjadi tanggung jawab pengguna. Hal ini menjadi tantangan untuk meyakinkan para pemangku kepentingan terhadap manfaat *Self Healing Concrete* bagi konstruksi jalan di Indonesia.

KESIMPULAN

Teknologi *Self-Healing Concrete* memiliki potensi besar untuk merevolusi infrastruktur jalan di Indonesia. Adanya peluang penggunaan *Self Healing Concrete* sebagai teknologi konstruksi jalan masa depan seperti peningkatan efisiensi infrastruktur, mendukung keberlanjutan lingkungan, adaptasi dengan iklim Indonesia, dukungan stakeholder, kolaborasi dengan institusi penelitian, dan efisiensi biaya jangka panjang. Selain itu diperlukan strategi menghadapi tantangan penggunaan *Self Healing Concrete* yang meliputi biaya awal yang tinggi, keterbatasan teknologi, kondisi logistik dan infrastruktur, kurangnya pengetahuan dan sumber daya manusia, regulasi dan standar, resistensi terhadap perubahan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada pihak-pihak yang mendukung terlaksananya penelitian ini, khususnya kepada Akademi Militer, sehingga Penulis dapat menyelesaikan penelitian ini tepat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Khushnood, A. Arif, N. Shaheen, A.G. Zafar, T. Hassan, M. Akif, 2022, Bio-inspired self-healing and self-sensing cementitious mortar using *Bacillus subtilis* immobilized on graphitic platelets, *Constr. Build. Mater.* 316, 125818.
- Abdulloh. F, (2015), Analisis Perbedaan Biaya Konstruksi Jalan Beton dan Jalan Aspal dengan Metode Bina Marga dan AASHTO 1993 Selama Umur Rencana 20 Tahun (Studi Kasus Pada Proyek Jalan Tol Mojokerto Kertosono) STA. 0+000 - STA 5+000, *Extrapolasi Jurnal Teknik Sipil Untag Surabaya*, Juli 2013, Vol. 06, No. 01, hal 75 – 90.
- Badan Pengatur Jalan Tol Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2024, Jalan Tol Beroperasi di Indonesia Telah mencapai 2.816 Km, <https://bpjt.pu.go.id/berita/jalan-tol-beroperasi-di-indonesia-telah-mencapai-2816-km>
- Burcu. A, Mardan. A, Yazıcı. S, 2023, State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties.
- Ekaputri, Jaya. J, et. All, 2020, bersama PT. Solusi Bangun Indonesia dengan judul Artificial Geopolymer Aggregate-Bio Concrete dari Mikroba Terkapsulasi dalam Limbah B3 PLTU sebagai Penyembuh Retak (Self Healing) pada Beton, Surabaya: Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat ITS, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>.
- Jonkers, H.M, Self Healing Concrete: A Biological Approach. In Springer Series in Materials Science; Springer: Dordrecht,
- Kurohman, Novik, 2023, Self-Healing Concrete pada Teknologi Material Beton dalam Menjawab Tantangan Infrastruktur di Masa Depan, <https://depobeta.com/magazine/artikel/self-healing-concrete-teknologi/>
- Mohanadoss et al., 2015, Bioconcrete Strength, Durability, Permeability, Recycling and Effects on Human Health: A Review. *Intl. Conf. Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering*. DOI: 10.15224/978-1-63248-062-0-28.
- Peraturan Menteri No 9, 2021, tentang konstruksi yang berkelanjutan (*Sustainable Construction*).
- Rahayu, Widi. A, 2024, Mengenal Self Healing Concrete (SHC): Teknologi Canggih untuk Beton Rusak, <https://www.megabaja.co.id/mengenal-self-healing-concrete-shc-teknologi-canggih-untuk-beton-rusak/>
- Risdanareni, Puput, 2024, Inovasi Fly Ash-based LWA untuk Self-Healing Concrete dari Puput Risdanareni, <https://lustrum.um.ac.id/inovasi-fly-ash-based-alkali-activated-lightweight-aggregate-untuk-self-healing-concrete-dari-puput-risdanareni/>

- Sangadji, S., et al., 2017, Potential of Self Healing Concrete in tropical environments.
- Seifan, A. Berenjian, 2018, Application of microbially induced calcium carbonate precipitation in designing bio self-healing concrete, World J. Microbiol. Biotechnol. 34. 16, [Self Healing Concrete, Prospek Solusi Masalah Beton Masa Kini dan Masa Mendatang](https://www.channelpondasi.com/articles/self-healing-concrete-prospek-solusi-masalah-beton-masa-kini-dan-masa-mendatang#comments) <https://www.channelpondasi.com/articles/self-healing-concrete-prospek-solusi-masalah-beton-masa-kini-dan-masa-mendatang#comments>
- Surat Edaran Dirjen Bina Marga No 16/SE/Db/2020, 2020, Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2).
- Teknologi Konstruksi Inovatif Masa Depan, <http://ptb.sipil.ft.unp.ac.id/teknologi-konstruksi-inovatif-masa-depan/>
- The Netherlands, 2007; Volume 100, pp. 195–204 Tittelboom, K. V., et al. (2012). "Self-healing concrete by the combination of microfibres and superabsorbent polymers."
- Triatmodjo, Marsudi, et al., 2022, Pulau Kepulauan dan Negara Kepulauan, Yogyakarta: UGM Press.
- Undang-Undang No. 2, 2017, Tentang Jasa Konstruksi berperan penting dalam mendukung berbagai bidang pembangunan, termasuk mendorong peran serta teknologi dalam Percepatan Pembangunan Infrastruktur.
- Undang-Undang Nomor 22, 2009, tentang Lalu Lintas dan Angkutan Jalan.
- Universitas Bakrie, 2024, Jalan Beton VS Jalan Aspal, Apa Saja Kekurangan dan Kelebihannya?, <https://bakrie.ac.id/articles/443-jalan-beton-vs-jalan-aspal-apa-saja-kekurangan-dan-kelebihannya.html>
- V. Zhang, A.R. Suleiman, M.M. Allaf, A. Marani, M. Tuyan, M.L. Nehdi, 2022, Crack self-healing in alkali-activated slag composites incorporating immobilized bacteria, Constr. Build. Mater. 326, 126842.
- Van der Zwaag, S., 2008, Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science, <https://doi.org/10.1515/ci.2008.30.6.20>