

OPTIMASI MEDIA NUTRISI BAKTERI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI SELF-HEALING PADA BETON RAMAH LINGKUNGAN

Agnes Veranika¹, Anggun Harahap², Putri Nazwa Asfani³

agnesveranika5@mhs.unimed.ac.id¹, anggunharahap39@gmail.com², asfaniputri03@gmail.com³

Universitas Negeri Medan

ABSTRAK

Retakan mikro pada beton dapat menurunkan durabilitas dan umur layanan struktur. Teknologi self-healing berbasis bakteri menjadi solusi inovatif melalui mekanisme presipitasi kalsium karbonat (CaCO_3) yang mampu menutup retakan secara alami. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi media nutrisi bakteri untuk meningkatkan efisiensi self-healing pada beton ramah lingkungan. Metode eksperimen dilakukan dengan variasi komposisi nutrisi (kalsium laktat, urea, dan ekstrak ragi) serta satu sampel kontrol. Parameter yang diuji meliputi persentase penutupan retak, kuat tekan, dan permeabilitas. Hasil menunjukkan bahwa komposisi nutrisi optimal mampu meningkatkan penutupan retak hingga lebih dari 90%, disertai peningkatan kuat tekan dan penurunan permeabilitas dibandingkan beton kontrol. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi media nutrisi berperan penting dalam meningkatkan efektivitas self-healing concrete sebagai material konstruksi yang lebih tahan lama dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Self-Healing Concrete, Presipitasi Kalsium Karbonat, Optimasi Nutrisi Bakteri.

ABSTRACT

Microcracks in concrete can decrease the durability and service life of the structure. Bacteria-based self-healing technology is an innovative solution through a calcium carbonate (CaCO_3) precipitation mechanism that is able to close cracks naturally. This research aims to optimize bacterial nutrient media to improve the self-healing efficiency of environmentally friendly concrete. The experimental method was carried out with variations in nutrient composition (calcium lactate, urea, and yeast extract) as well as one control sample. The parameters tested included crack closure percentage, compressive strength, and permeability. The results showed that the optimal nutrient composition was able to increase crack closure by more than 90%, accompanied by an increase in compressive strength and a decrease in permeability compared to control concrete. These findings confirm that the optimization of nutrient media plays an important role in increasing the effectiveness of self-healing concrete as a more durable and sustainable construction material.

Kata Kunci: Self-Healing Concrete, Calcium Carbonate Precipitation, Bacterial Nutrition Optimization.

PENDAHULUAN

Beton adalah salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia modern karena sifat mekaniknya yang baik, biaya produksi yang relatif rendah, dan ketersediaannya yang mudah di berbagai wilayah. Beton telah menjadi material utama dalam pembangunan infrastruktur seperti gedung, jalan, jembatan, dan pelabuhan. Namun demikian, beton memiliki kelemahan penting berupa rentannya material ini terhadap retak akibat beban struktural, perubahan suhu, penyusutan, gaya siklik, maupun korosi baja tulangan. Retak ini tidak hanya menurunkan kekuatan struktural beton, tetapi juga mempercepat degradasi melalui infiltrasi air dan ion agresif dari lingkungan eksternal yang dapat menyebabkan kerusakan permanen bila tidak segera ditanggulangi. Agregat ringan menjadi pilihan menarik sebagai pembawa bakteri pada beton yang dapat memperbaiki diri. Dalam konteks ini, agregat ringan muncul sebagai salah satu opsi yang menjanjikan sebagai pembawa bakteri dalam sistem beton yang mampu menyembuhkan

diri. Oleh karena itu, pemilihan jenis zat penyembuh dan pembawa yang sesuai sangat penting untuk mempertahankan kinerja mekanis beton yang dihasilkan (Alfaro et al. 2025).

Teknik self-healing adalah metode yang efektif untuk memperbaiki retakan kecil di permukaan beton. Dengan menambahkan bakteri, proses ini menghasilkan endapan kalsium karbonat yang membentuk lapisan penutup atas retakan di beton (Muhammad et al. 2024). Retakan mikro yang tidak terdeteksi pada tahap dini dapat berkembang menjadi retakan makro yang membutuhkan perbaikan manual dengan metode konvensional seperti aplikasi mortar, perbaikan epoxy, atau injeksi resin. Metode ini umumnya memerlukan biaya tinggi, waktu pengerjaan yang panjang, serta seringkali tidak ramah lingkungan karena menggunakan bahan kimia sintetis.

Teknologi Self-Healing Concrete muncul sebagai solusi inovatif untuk mengatasi kelemahan ini. Self-Healing Concrete atau beton pulih mandiri adalah jenis beton yang mampu menutup retakan secara otomatis tanpa campur tangan manusia melalui mekanisme biologis atau reaksi kimia internal. Salah satu mekanisme yang paling menjanjikan dan banyak diteliti adalah dengan mengintegrasikan bakteri hidup ke dalam matriks beton yang mampu memproduksi mineral (seperti kalsium karbonat / CaCO_3) yang mengisi retakan saat ada air masuk ke dalam beton (Dr. S. Sakthivel 2022)

Penggunaan bakteri dalam beton menyediakan alternatif green technology yang meningkatkan daya tahan material sekaligus memberikan manfaat lingkungan. Beton dengan agent bakteri ini sering disebut sebagai bio-concrete atau bacterial self-healing concrete. Banyak penelitian menunjukkan bahwa bakteri tertentu seperti *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, dan strain lain dari genus *Bacillus* mampu memproduksi kalsium karbonat melalui proses MICP (Microbial Induced Calcite Precipitation) sehingga crack dapat terisi alami (Azizi dan Mokhtar 2023).

Namun, salah satu tantangan utama dalam implementasi teknologi ini adalah bagaimana memaksimalkan efisiensi self-healing yang dihasilkan oleh bakteri tersebut. Efisiensi self-healing sangat bergantung pada kemampuan bakteri untuk bertahan hidup, berkultur, dan menghasilkan mineral yang cukup ketika retakan terjadi. Salah satu faktor penting yang memengaruhi kemampuan ini adalah media nutrisi yang tersedia bagi bakteri dalam beton. Media nutrisi tidak hanya berperan untuk mendukung pertumbuhan bakteri, tetapi juga mempengaruhi aktivitas metaboliknya sehingga memengaruhi produksi mineral yang menyumbat retakan. Walaupun teknologi self-healing beton berbasis bakteri telah banyak diteliti, kebanyakan penelitian masih terfokus pada penggunaan bakteri dan pengujian efektivitasnya terhadap kekuatan atau kemampuan retak tertutup, tanpa membahas optimalisasi media nutrisi yang mendukung aktivitas bakteri secara mendalam. Sebagian besar penelitian hanya menggunakan media nutrisi standar seperti yeast extract atau sumber karbon umum tanpa variatif atau tanpa diuji efeknya terhadap efisiensi self-healing.

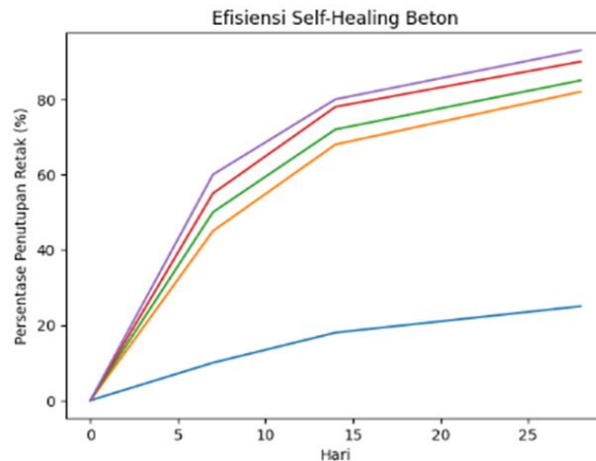
Oleh karena itu, diperlukan riset lanjutan untuk mengoptimalkan komposisi media nutrisi bagi bakteri agar mereka dapat bekerja secara efektif dalam lingkungan beton yang keras dan bersifat basah alkali. Optimalisasi media nutrisi diharapkan dapat meningkatkan efisiensi self-healing sekaligus menjaga sifat mekanik beton tetap baik. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan dengan menyediakan panduan formulasi media nutrisi yang optimal dan ekonomis yang dapat digunakan oleh peneliti maupun industri konstruksi dalam mengembangkan aplikasi self-healing beton. Dengan memaksimalkan aktivitas bakteri melalui media nutrisi yang tepat, efisiensi self-healing diharapkan meningkat secara signifikan dibandingkan beton dengan media nutrisi

standar yang sering digunakan saat ini.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Desain penelitian menggunakan metode eksperimen faktorial untuk menguji pengaruh variasi media nutrisi bakteri terhadap efisiensi self-healing beton.

HASIL DAN PEMBAHASAN

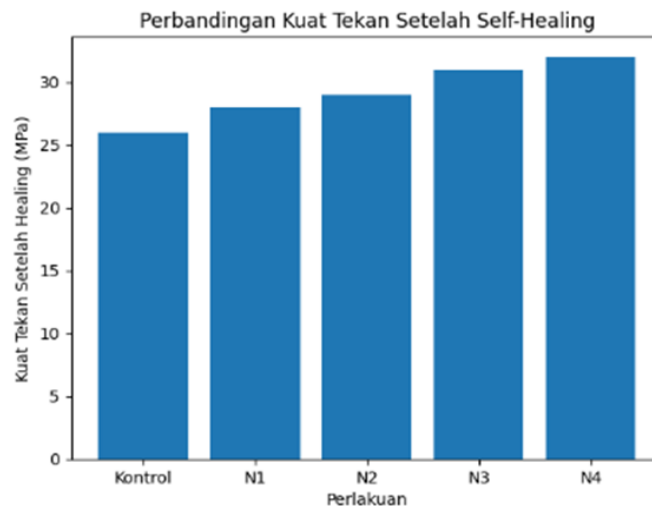


Berdasarkan grafik diatas, terlihat bahwa seluruh variasi media nutrisi (N1, N2, N3, dan N4) menunjukkan tren peningkatan persentase penutupan retakan yang signifikan dibandingkan beton kontrol. Pada hari ke-7, beton kontrol hanya menunjukkan penutupan sebesar 10%, sedangkan perlakuan N4 telah mencapai 60%. Perbedaan ini semakin jelas pada hari ke-28, di mana beton kontrol hanya mencapai 25%, sedangkan N4 mencapai 93%.

Peningkatan signifikan ini menunjukkan bahwa keberadaan media nutrisi yang optimal mampu meningkatkan aktivitas metabolik bakteri dalam menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3). Proses biomineralisasi melalui mekanisme Microbial Induced Calcite Precipitation (MICP) menghasilkan kristal kalsit yang mengisi celah retakan secara bertahap. Semakin efektif nutrisi mendukung metabolisme bakteri, semakin besar volume CaCO_3 yang terbentuk.

Perlakuan N4 menunjukkan performa terbaik karena kombinasi sumber karbon (molase + laktat) menyediakan energi yang lebih stabil dan berkelanjutan bagi bakteri. Molase sebagai sumber karbon kompleks memperpanjang aktivitas bakteri, sedangkan laktat mempercepat pembentukan CaCO_3 tanpa menghasilkan produk samping yang merugikan. Hal ini menjelaskan mengapa laju penutupan retakan pada N4 paling cepat dan paling tinggi.

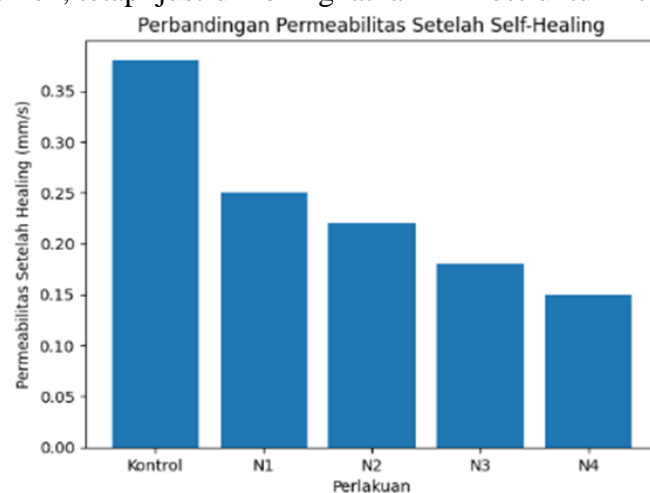
Sebaliknya, beton kontrol hanya mengandalkan autogenous healing alami akibat hidrasi lanjutan semen, sehingga kemampuannya sangat terbatas. Hasil ini menegaskan bahwa optimasi media nutrisi merupakan faktor penting dalam meningkatkan efisiensi self-healing beton berbasis bakteri.



Grafik diatas menunjukkan bahwa beton dengan perlakuan bakteri mengalami pemulihan kuat tekan yang lebih baik dibandingkan beton kontrol. Beton kontrol mengalami penurunan kuat tekan dari 28 MPa menjadi 26 MPa akibat retakan yang tidak tertutup sempurna.

Sebaliknya, perlakuan N3 dan N4 menunjukkan pemulihan hampir penuh, dengan nilai kuat tekan mencapai 31–32 MPa setelah proses healing. Hal ini menunjukkan bahwa kristal CaCO_3 yang terbentuk tidak hanya menutup retakan secara visual, tetapi juga memperbaiki integritas struktural beton. Pemulihan kuat tekan terjadi karena CaCO_3 mengisi retakan dan memperkuat zona transisi antar agregat (Interfacial Transition Zone/ITZ). Zona ini merupakan bagian yang paling rentan dalam beton. Ketika retakan diisi oleh kristal kalsit yang stabil, distribusi tegangan dalam beton menjadi lebih merata sehingga kapasitas tekan meningkat kembali.

Perlakuan N4 menunjukkan hasil terbaik karena produksi mineral yang lebih padat dan menyeluruh. Hal ini membuktikan bahwa media nutrisi yang dioptimalkan tidak merusak matriks semen, tetapi justru meningkatkan mikrostruktur internal beton.



Grafik diatas menunjukkan penurunan nilai permeabilitas yang signifikan pada beton dengan perlakuan nutrisi dibandingkan kontrol. Beton kontrol hanya mengalami sedikit penurunan permeabilitas (0,45 menjadi 0,38 mm/s), sedangkan N4 menunjukkan penurunan drastis hingga 0,15 mm/s.

Penurunan permeabilitas ini menunjukkan bahwa kristal CaCO_3 tidak hanya menutup retakan utama, tetapi juga menyumbat pori-pori mikro dalam matriks beton.

Struktur beton menjadi lebih rapat dan kedap air, sehingga penetrasi air dan ion agresif dapat diminimalkan. Permeabilitas yang rendah sangat penting dalam konteks beton ramah lingkungan karena:

1. Mengurangi risiko korosi tulangan baja
2. Meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan agresif
3. Memperpanjang umur layanan struktur
4. Mengurangi kebutuhan perbaikan berkala

Hasil ini mengindikasikan bahwa optimasi media nutrisi tidak hanya berdampak pada retakan permukaan, tetapi juga meningkatkan durabilitas jangka panjang beton.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan mengenai optimasi media nutrisi bakteri dalam meningkatkan efisiensi self-healing pada beton ramah lingkungan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Beton dengan penambahan bakteri dan nutrisi menunjukkan peningkatan persentase penutupan retakan yang jauh lebih tinggi dibandingkan beton kontrol. Pada hari ke-28, efisiensi penutupan retakan pada perlakuan terbaik (N4) mencapai 93%, sedangkan beton kontrol hanya mencapai 25%.
2. Kombinasi sumber karbon dan nitrogen yang tepat mampu meningkatkan produksi kalsium karbonat (CaCO_3) yang berfungsi sebagai material pengisi retakan. Produksi mineral yang lebih optimal menghasilkan struktur kristal kalsit yang padat dan stabil dalam matriks beton.
3. Perlakuan N4 menunjukkan pemulihan kuat tekan hingga mendekati 100% dari kondisi awal, yang menunjukkan bahwa proses penyembuhan memperbaiki integritas struktural beton secara efektif.
4. Penurunan nilai permeabilitas secara signifikan pada perlakuan dengan nutrisi optimal menunjukkan bahwa struktur beton menjadi lebih rapat dan lebih tahan terhadap penetrasi air serta zat agresif.
5. Kombinasi tersebut memberikan keseimbangan antara sumber energi bakteri dan ketersediaan ion kalsium untuk presipitasi mineral, sehingga menghasilkan efisiensi self-healing tertinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfaro, Theo, Dida Darmajaya, Departemen Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, and Bambang Supriyadi. 2025. "Jurnal Teoretis Dan Terapan Penerapan Teknologi Self-Healing Pada Beton Ringan: Tinjauan Literatur." 32(2): 273–84. doi:10.5614/jts.2025.32.2.14.
- Azizi, Nur Fatihah, and Norfaniza Mokhtar. 2023. "A Review of Self-Healing Concrete Using Bacillus Bacteria as Healing Agent on Compressive Strength of Concrete." 4(3): 271–78.
- Bang, S. S., Galinat, J. K., & Ramakrishnan, V. (2001). Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized Bacillus pasteurii. *Enzyme and Microbial Technology*, 28(4–5), 404–409.
- Basilisk. (2015). Self-healing concrete technology report. Delft University of Technology.
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., ... & Litina, C. (2018). A review of self-healing concrete for damage management of structures. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1800074. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>
- Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B. D., & Pal, S. (2005). Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1980–1983.
- Jonkers, H. M. (2007). Self-healing concrete: A biological approach. In S. van der Zwaag (Ed.), *Self-healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science* (pp.

- 195–204). Springer.
- Jonkers, H. M. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron*, 56(1–2), 1–12.
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 36(2), 230–235.
- Kanellopoulos, A., Giannaros, P., & Al-Tabbaa, A. (2015). The effect of varying volume fraction of microcapsules on fresh, mechanical and self-healing properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 94, 719–727.
- Khaliq, W., & Ehsan, M. B. (2016). Crack healing in concrete using various bio influenced self-healing techniques. *Construction and Building Materials*, 102, 349–357.
- Li, V. C., & Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10(6), 207–218.
- Luo, M., Qian, C., & Li, R. (2015). Factors affecting crack repairing capacity of bacteria-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 87, 1–7. “Materials Today : Proceedings Expression of Concern- [Part 4].” 2022. 33: 2022. doi:10.1016/j.matpr.2022.12.013.
- Muhammad, Baso, Ilham Alimin, Luthfi Muhammad Mauludin, Jurusan Teknik, Sipil Politeknik, and Negeri Bandung. 2024. “EVALUASI EFEKTIVITAS BAKTERI BACILLUS MEGATERIUM SEBAGAI MATERIAL INJEKSI SELF- HEALING UNTUK PERBAIKAN RETAK BETON.”
- Nain, N., Surabhi, Y., Yathish, K. V., Krishnamurthy, V., Deepa, T., & Tharannum, S. (2019). Enhancement in strength parameters of concrete by application of Bacillus bacteria. *Construction and Building Materials*, 202, 904–908.
- Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H., & Cousture, A. (2019). Bacterial self-healing concrete: A review. *Sustainable Materials and Technologies*, 19, e00081.
- Qian, C., Wang, R., Cheng, L., & Wang, J. (2010). Theory of microbial carbonate precipitation and its application in restoration of cement-based materials defects. *Chinese Science Bulletin*, 55(22), 2588–2596.
- Xu, J., Wang, X., & Wang, L. (2018). Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-based healing agent. *Cement and Concrete Research*, 113, 1–11.
- Zhang, J., Liu, Y., Feng, T., Zhou, M., Zhao, L., Zhou, A., & Li, Z. (2017). Immobilizing bacteria in expanded perlite for the crack self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 610–617.