

SELF HEALING CONCRETE MENGGUNAKAN BAKTERI *BACILLUS SUBTILIS* DENGAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI SUBSTITUSI SEBAGIAN SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON

Muhammad Jawahirul Furqon¹, Suprpto²
D4 Teknik Sipil, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya
E-mail: [*jawahirfurqon@gmail.com](mailto:jawahirfurqon@gmail.com)¹

ABSTRAK

Beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan karena memiliki kekuatan tinggi, mudah dibentuk, dan ekonomis. Namun, sifat beton yang getas menyebabkan beton mudah retak sehingga dapat menurunkan durabilitas struktur. Salah satu inovasi untuk mengatasi masalah tersebut adalah *self healing concrete* menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* yang mampu menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) untuk menutup retakan secara alami. Selain itu, pemanfaatan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen menjadi solusi ramah lingkungan karena mengandung silika amorf yang bersifat pozzolanik dan dapat meningkatkan kualitas beton. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh penambahan bakteri *Bacillus subtilis* terhadap kemampuan *self healing* dan kuat tekan beton dengan abu sekam padi sebagai substitusi sebagian semen. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan mutu beton rencana f'_c 20 MPa. Abu sekam padi digunakan sebagai substitusi semen sebesar 20%, sedangkan bakteri *Bacillus subtilis* ditambahkan dengan variasi 0,5%, 1%, dan 1,5%. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian meliputi slump, kuat tekan beton sebelum dan sesudah proses *self healing*, serta pengamatan penutupan retak selama perendaman 28 hari. Analisis kemampuan *self healing* dilakukan dengan membandingkan lebar retakan sebelum dan sesudah perendaman menggunakan jangka sorong digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bakteri *Bacillus subtilis* berpengaruh terhadap kemampuan *self healing* beton. Seluruh variasi bakteri (0,5%, 1%, dan 1,5%) menunjukkan efektivitas penutupan retakan sebesar 100%, ditandai dengan tertutupnya retakan dari 0,02–0,03 mm menjadi 0 mm setelah perendaman selama 28 hari. Selain itu, seluruh benda uji mampu mengembalikan kekuatan beton hingga 100% setelah mengalami retak. Beton dengan penambahan abu sekam padi (RHA) 20% menghasilkan kuat tekan pasca-*self healing* sebesar 23,80 MPa, sedangkan beton tanpa RHA sebesar 22,04 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi bakteri *Bacillus subtilis* dan abu sekam padi memiliki kemampuan yang baik dalam proses perbaikan mandiri beton serta berpotensi mendukung durabilitas beton.

Kata Kunci

Self healing concrete, Bacillus subtilis, abu sekam padi, kuat tekan beton, penutupan retak.

ABSTRACT

Concrete is widely used in construction due to its high strength, ease of molding, and cost-effectiveness. However, its brittle nature makes it susceptible to cracking, which can reduce structural durability. One innovation developed to address this issue is *self-healing concrete* using *Bacillus subtilis* bacteria, which can produce calcium carbonate (CaCO_3) deposits to naturally seal cracks. In addition, the use of rice husk ash as a partial cement replacement is an environmentally friendly solution because it contains amorphous silica with pozzolanic properties that can improve concrete quality. This

study aims to determine the effect of Bacillus subtilis addition on the self-healing capability and compressive strength of concrete containing rice husk ash as a partial cement substitute. The research employed a laboratory experimental method with a target concrete strength of f_c 20 MPa. Rice husk ash was used as a 20% cement replacement, while Bacillus subtilis was added at variations of 0.5%, 1%, and 1.5%. Cylindrical specimens with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm were prepared. Tests included slump, compressive strength before and after the self-healing process, and observation of crack closure during a 28-day immersion period. Self-healing performance was analyzed by comparing crack widths before and after immersion using a digital caliper. The results showed that the addition of Bacillus subtilis bacteria affected the self-healing capability and compressive strength recovery of concrete. All bacterial variations (0.5%, 1%, and 1.5%) exhibited 100% crack-healing effectiveness, as indicated by the complete closure of cracks from an initial width of 0.02–0.03 mm to 0 mm after 28 days of curing. In addition, all specimens containing Bacillus subtilis were able to restore concrete strength up to 100% after cracking. Concrete containing 20% Rice Husk Ash (RHA) achieved a post-self-healing compressive strength of 23.80 MPa, whereas concrete without RHA reached 22.04 MPa. These findings indicate that the combination of Bacillus subtilis bacteria and Rice Husk Ash has good potential for autonomous crack repair and may contribute to improved concrete durability.

Keywords

Self-healing concrete, Bacillus subtilis, rice husk ash, concrete compressive strength, crack healing.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki kuat tekan yang tinggi, mudah dibentuk, dan relatif ekonomis. Meskipun demikian, beton memiliki kelemahan berupa sifat getas yang menyebabkan mudah terbentuknya retakan akibat beban, perubahan suhu, penyusutan, maupun pengaruh lingkungan. Retakan yang terjadi dapat menjadi jalur masuk air, ion klorida, dan zat agresif lainnya yang mempercepat korosi tulangan serta menurunkan umur layan struktur beton. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material beton yang mampu meningkatkan durabilitas dan memperpanjang masa layan struktur konstruksi (Kasra Amooresae & Tohid Ghanbari-Ghazijahan, 2025).

Salah satu inovasi yang berkembang dalam teknologi beton adalah *self-healing concrete*. Teknologi ini memungkinkan beton memperbaiki retakan secara mandiri melalui proses biologis maupun kimiawi. Pada metode biologis, bakteri digunakan untuk menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui mekanisme *Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation* (MICP). Endapan tersebut berfungsi mengisi retakan dan pori-pori beton sehingga dapat meningkatkan durabilitas dan memulihkan sebagian sifat mekaniknya. Salah satu bakteri yang banyak digunakan adalah *Bacillus subtilis* karena mampu bertahan pada lingkungan beton yang bersifat basa serta efektif menghasilkan presipitasi kalsium karbonat untuk proses penyembuhan retak (Fauzan Gumelar As'at & Rika Nuraini, 2020; Yuanyuan Tie et al., 2024).

Selain penggunaan bakteri, pengembangan beton berkelanjutan dapat dilakukan melalui pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan substitusi semen. Abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) merupakan material pozzolan yang mengandung silika amorf tinggi sehingga mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi abu sekam padi dan *Bacillus subtilis* dapat meningkatkan

kuat tekan beton, memperbaiki mikrostruktur beton, mengurangi porositas, serta meningkatkan kemampuan *self-healing*. Selain ramah lingkungan, pemanfaatan abu sekam padi juga berkontribusi dalam mengurangi penggunaan semen dan limbah pertanian (Rajesh Anbazhagan et al., 2024; Vishvajit B. Kokate & Shashi R. Kumar, 2022).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan *Bacillus subtilis* dengan konsentrasi tertentu memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan konsentrasi lainnya. Yuanyuan Tie et al. (2024) melaporkan bahwa konsentrasi bakteri yang optimum mampu meningkatkan sifat mekanik beton secara signifikan, sedangkan konsentrasi yang terlalu tinggi dapat menurunkan performa akibat keterbatasan ruang tumbuh bakteri. Namun demikian, penelitian mengenai pengaruh variasi kadar *Bacillus subtilis* pada beton *self-healing* dengan substitusi abu sekam padi sebesar 20% masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi *Bacillus subtilis* terhadap kemampuan *self-healing* dan kuat tekan beton dengan substitusi abu sekam padi 20%, serta menentukan variasi yang menghasilkan performa optimum. Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi *Bacillus subtilis* terhadap kemampuan penyembuhan retak dan kuat tekan beton serta variasi yang menghasilkan kinerja terbaik. Adapun tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penambahan *Bacillus subtilis* dan menentukan kadar optimum bakteri pada beton *self-healing* dengan substitusi abu sekam padi 20%.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi kadar *Bacillus subtilis* terhadap kemampuan *self-healing* dan kuat tekan beton dengan substitusi abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebesar 20% dari berat semen. Metode eksperimen dipilih karena memungkinkan pengamatan secara langsung terhadap pengaruh penambahan *Bacillus subtilis* pada campuran beton serta evaluasi kinerja beton berdasarkan parameter kemampuan *self-healing* dan kuat tekan.

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Universitas Narotama Surabaya karena memiliki fasilitas dan peralatan yang memadai untuk seluruh tahapan penelitian, mulai dari persiapan material, pencampuran, pencetakan benda uji, perawatan (*curing*), hingga pengujian beton. Seluruh kegiatan dilakukan sesuai prosedur laboratorium untuk menjaga konsistensi dan akurasi hasil. Pengujian karakteristik material, slump beton segar, kemampuan *self-healing*, dan kuat tekan beton dilaksanakan pada laboratorium yang sama sehingga kondisi pengujian dapat dikendalikan dengan baik dan pengaruh faktor eksternal dapat diminimalkan.

2.2 Material Penelitian

Material penelitian terdiri atas semen Portland, agregat halus, agregat kasar, air, abu sekam padi (RHA), dan bakteri *Bacillus subtilis*. RHA digunakan sebagai substitusi semen sebesar 20%, sedangkan *Bacillus subtilis* ditambahkan sebesar 0,5%, 1%, dan 1,5% dari berat semen sebagai agen *self-healing* melalui mekanisme MICP untuk meningkatkan penyembuhan retak dan kuat tekan beton.

2.3 Benda Uji

Benda uji berupa silinder beton berukuran 150 mm × 300 mm dengan mutu rencana f_c' 20 MPa dan substitusi abu sekam padi (RHA) sebesar 20% dari berat semen.

Benda uji dibuat sesuai *mix design*, kemudian dilepas dari cetakan setelah 24 jam dan dirawat dengan metode perendaman hingga umur pengujian.

2.4 Pengujian Slump

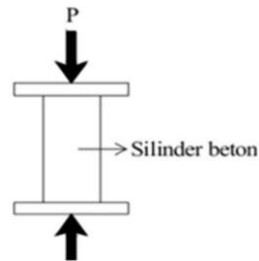
Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui *workability* beton segar menggunakan kerucut Abrams. Nilai slump menunjukkan tingkat konsistensi dan kemudahan pengerjaan beton serta digunakan untuk menganalisis pengaruh penambahan abu sekam padi dan *Bacillus subtilis* terhadap sifat beton segar.

2.5 Pengujian Self Healing

Pengujian *self-healing* dilakukan dengan mengamati kemampuan beton menutup retakan secara mandiri. Retakan awal diukur, kemudian benda uji disimpan dalam kondisi yang mendukung aktivitas *Bacillus subtilis* untuk menghasilkan endapan CaCO_3 . Setelah masa penyembuhan, lebar retakan diukur kembali untuk menentukan efektivitas penutupan retak pada setiap variasi bakteri.

2.6 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji tekan pada benda uji silinder hingga mencapai keruntuhan. Nilai kuat tekan diperoleh dari beban maksimum yang mampu ditahan beton selama pengujian.



Gambar 1. Simulasi Pengujian Kuat Tekan Beton
Source: (Data Penelitian Pribadi)

Nilai kuat tekan dihitung dari perbandingan beban maksimum terhadap luas penampang benda uji. Hasilnya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh *Bacillus subtilis* dan abu sekam padi terhadap sifat mekanik beton serta menentukan variasi campuran yang paling optimal (Suardi et al., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Slump Test

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) beton segar pada setiap variasi campuran. Nilai slump yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan *Bacillus subtilis* dan substitusi abu sekam padi sebesar 20% memberikan pengaruh terhadap konsistensi campuran beton. Hasil pengujian slump dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Sump Test

Variasi	Jumlah	Nilai Slump (mm)	Rata - Rata (mm)
	3	75	

Benda Uji A	3	75	75
	3	75	
Benda Uji B (RHA 20%)	3	95	90
	3	75	
	3	100	
Benda uji C	3	85	85

Source: (Data Penelitian Pribadi)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi beton memiliki nilai slump yang masih memenuhi syarat *workability*. Perbedaan nilai slump dipengaruhi oleh penggunaan abu sekam padi yang meningkatkan kebutuhan air serta penambahan *Bacillus subtilis* yang memengaruhi homogenitas campuran. Secara umum, campuran beton tetap mudah dikerjakan tanpa mengalami segregasi atau *bleeding* berlebihan, sehingga penggunaan abu sekam padi 20% dan variasi *Bacillus subtilis* tidak menurunkan kualitas beton segar secara signifikan.

3.2 Hasil Pengamatan Self Healing

Pengamatan *self-healing* dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam memperbaiki retakan secara mandiri melalui aktivitas *Bacillus subtilis*. Pengamatan dilakukan dengan mengukur lebar retakan awal setelah proses pembebanan dan membandingkannya dengan lebar retakan setelah masa penyembuhan selama 28 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh variasi beton mengalami penurunan lebar retakan setelah periode penyembuhan. Data hasil pengukuran retakan sebelum dan sesudah proses *self-healing* disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Lebar Retakan Sebelum Proses Self Healing

Variasi		Lebar Retakan (mm)
Benda uji 1 A	I	0,03
	II	0,02
	III	0,02
Benda uji 2 A	I	0,02
	II	0,02
	III	0,02
Variasi		Lebar Retakan (mm)
Benda uji 3 A	I	0,02
	II	0,02
	III	0,02
Benda uji 1 B (RHA 20%)	I	0,02
	II	0,02
	III	0,02
Benda uji 2 B (RHA 20%)	I	0,02
	II	0,02
	III	0,02
Benda uji 3 B (RHA 20%)	I	0,02
	II	0,02
	III	0,02

Benda uji C	I	0,02
	II	0,02
	III	0,02

Source: (Data Penelitian Pribadi)

Tabel 3. Lebar Retakan Sesudah *Slef Healing*

Variasi		Kada r Bakte ri	Lebar Retakan Sebelum (mm)	Lebar Retakan Sesudah (mm)
Benda uji 1 A	I	0,5%	0,03	0
	II		0,02	0
	III		0,02	0
Benda uji 2 A	I	1%	0,02	0
	II		0,02	0
	III		0,02	0
Benda uji 3 A	I	1,5%	0,02	0
	II		0,02	0
	III		0,02	0
Benda uji 1 B (RHA 20%)	I	0,5%	0,02	0
	II		0,02	0
	III		0,02	0
Benda uji 2 B (RHA 20%)	I	1%	0,02	0
	II		0,02	0
	III		0,02	0
Benda uji 3 B (RHA 20%)	I	1,5%	0,02	0
	II		0,02	0
	III		0,02	0
Benda uji C	I	0%	0,02	0,02
	II		0,02	0,02
	III		0,02	0,02

Source: (Data Penelitian Pribadi)

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa retakan yang terbentuk pada beton sebelum penyembuhan mengalami penyempitan setelah proses *self-healing* selama 28 hari. Hal ini menunjukkan aktivitas *Bacillus subtilis* yang menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui mekanisme MICP sehingga mengisi dan menutup sebagian retakan. Selain meningkatkan kemampuan penyembuhan retak, endapan CaCO_3 juga membantu mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton. Temuan ini sejalan dengan penelitian Tie et al. (2024) yang menyatakan bahwa bakteri pada konsentrasi optimum dapat meningkatkan efektivitas penyembuhan retak beton.

3.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari untuk mengetahui pengaruh penambahan *Bacillus subtilis* terhadap sifat mekanik beton dengan substitusi abu sekam padi sebesar 20%. Hasil pengujian kuat tekan masing-masing variasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Variasi		Kadar Bakteri	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²) (A)	Beban (KN) (P)	Lebar Retakan (mm)	Kuat Tekan Sebelum (Mpa)	Kuat Tekan Sesudah (Mpa)	Rata - Rata (Mpa)
Benda uji 1 A	I	0,5%	170	22.697	500	0	11,02	22,04	22,04
	II	0,5%	170	22.697	500	0		22,04	
	III	0,5%	170	22.697	500	0		22,04	
Benda uji 2 A	I	1%	170	22.697	500	0	11,02	22,04	22,04
	II	1%	170	22.697	500	0		22,04	
	III	1%	170	22.697	500	0		22,04	
Benda uji 3 A	I	1,5%	170	22.697	500	0	11,02	22,04	22,04
	II	1,5%	170	22.697	500	0		22,04	
	III	1,5%	170	22.697	500	0		22,04	
Benda uji 1 B (RHA2 0%)	I	0,5%	170	22.697	540	0	11,90	23,80	23,80
	II	0,5%	170	22.697	540	0		23,80	
	III	0,5%	170	22.697	540	0		23,80	
Benda uji 2 B (RHA2 0%)	I	1%	170	22.697	540	0	11,90	23,80	23,80
	II	1%	170	22.697	540	0		23,80	
	III	1%	170	22.697	540	0		23,80	
Benda uji 3 B (RHA2 0%)	I	1,5%	170	22.697	540	0	11,90	23,80	23,80
	II	1,5%	170	22.697	540	0		23,80	
	III	1,5%	170	22.697	540	0		23,80	
Benda uji C	I	0%	170	22.697	470	0,02	11,02	20,70	20,7
	II	0%	170	22.697	470	0,02		20,70	
	III	0%	170	22.697	470	0,02		20,70	

Source: (Data Penelitian Pribadi)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh benda uji beton self-healing yang mengandung bakteri *Bacillus subtilis* mengalami pemulihan kuat tekan secara penuh setelah proses penyembuhan. Pada beton tipe A (tanpa RHA), kuat tekan meningkat dari 11,02 MPa menjadi 22,04 MPa, sedangkan pada tipe B dengan substitusi RHA 20% meningkat dari 11,90 MPa menjadi 23,80 MPa untuk seluruh variasi kadar bakteri (0,5%, 1%, dan 1,5%). Persentase pemulihan kuat tekan pada seluruh beton self-healing mencapai

100%, sementara beton kontrol tanpa bakteri dan RHA hanya mencapai 87,8%.

Selain itu, seluruh benda uji self-healing berhasil menutup retakan awal sebesar 0,02–0,03 mm secara sempurna hingga 0 mm setelah perendaman 28 hari, dengan persentase penutupan retakan mencapai 100%. Sebaliknya, beton kontrol tidak menunjukkan penyembuhan dengan persentase penutupan retakan 0%. Secara keseluruhan, penggunaan *Bacillus subtilis* efektif dalam memulihkan kuat tekan dan menutup retakan beton secara sempurna. Penambahan RHA 20% juga meningkatkan kuat tekan pasca-self-healing, sehingga kombinasi bakteri dan RHA berpotensi meningkatkan durabilitas serta umur layan beton.

3.4 Pembahasan

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan *Bacillus subtilis* terbukti meningkatkan kemampuan self-healing beton melalui pembentukan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang membantu menutup retakan dan memulihkan kuat tekan beton. Seluruh variasi kadar bakteri (0,5%, 1%, dan 1,5%) menunjukkan kinerja self-healing yang sangat baik, dengan persentase pemulihan kuat tekan dan penutupan retakan mencapai 100%. Selain itu, penggunaan abu sekam padi (RHA) sebagai substitusi semen sebesar 20% memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kuat tekan pasca-self-healing, yang ditunjukkan oleh nilai kuat tekan tipe B (23,80 MPa) yang lebih tinggi dibandingkan tipe A (22,04 MPa).

Berdasarkan data yang diperoleh, seluruh variasi kadar *Bacillus subtilis* menghasilkan tingkat pemulihan yang sama, sehingga tidak dapat ditentukan adanya kadar bakteri optimum yang paling efektif. Namun, kombinasi *Bacillus subtilis* dan RHA 20% menunjukkan kinerja terbaik karena menghasilkan kuat tekan pasca-self-healing yang lebih tinggi. Hasil ini mendukung penelitian Fauzan Gumelar As'at dan Rika Nuraini (2020) serta Tie et al. (2024) yang menyatakan bahwa penggunaan *Bacillus subtilis* dapat meningkatkan sifat mekanik beton sekaligus mendukung proses penyembuhan retak secara alami.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan *Bacillus subtilis* pada self-healing concrete dengan substitusi abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) sebesar 20%, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *Bacillus subtilis* mampu meningkatkan kemampuan self-healing beton. Seluruh variasi kadar bakteri yang digunakan menunjukkan keberhasilan penyembuhan retak dengan persentase penutupan retakan mencapai 100% setelah proses perendaman selama 28 hari. Kemampuan tersebut terjadi karena aktivitas bakteri menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang mengisi retakan dan pori-pori beton.

Hasil pengujian kuat tekan juga menunjukkan bahwa seluruh beton self-healing mengalami pemulihan kuat tekan sebesar 100% setelah proses penyembuhan. Pada beton tanpa RHA (tipe A), kuat tekan meningkat dari 11,02 MPa menjadi 22,04 MPa, sedangkan pada beton dengan substitusi RHA 20% (tipe B) meningkat dari 11,90 MPa menjadi 23,80 MPa. Sebaliknya, beton kontrol tanpa bakteri dan RHA hanya mencapai pemulihan kuat tekan sebesar 87,8%.

Selain berperan dalam proses self-healing, penggunaan RHA sebesar 20% memberikan kontribusi positif terhadap kinerja beton yang ditunjukkan oleh nilai kuat

tekan pasca-self-healing yang lebih tinggi dibandingkan beton tanpa RHA. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi *Bacillus subtilis* dan RHA mampu meningkatkan kualitas mikrostruktur beton melalui pembentukan endapan CaCO_3 dan produk reaksi pozzolanik tambahan. Secara keseluruhan, teknologi self-healing concrete menggunakan *Bacillus subtilis* dan substitusi RHA 20% terbukti efektif dalam menutup retakan secara sempurna dan memulihkan kuat tekan beton hingga 100%, sehingga berpotensi meningkatkan durabilitas serta umur layan struktur beton. Karena seluruh variasi kadar bakteri memberikan hasil yang sama, penelitian ini tidak menunjukkan adanya kadar *Bacillus subtilis* optimum yang paling unggul di antara variasi 0,5%, 1%, dan 1,5%.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Amoorezaei, K., & Ghanbari-Ghazijahani, T. (2025). A comprehensive review: Self-healing methods and cementitious composites. *Structures*, 72, 108038.
- ASTM International. (1978). *ASTM C128-78: Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (1988). *ASTM C127-88: Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (1989). *ASTM C566-89: Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying*. ASTM International.
- ASTM International. (1991). *ASTM C29/C29M-91: Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate*. ASTM International.
- ASTM International. (1995). *ASTM C117-95: Standard test method for materials finer than 75- μm (No. 200) sieve in mineral aggregates by washing*. ASTM International.
- ASTM International. (1995a). *ASTM C136/C136M-95a: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). *ASTM C188: Standard test method for density of hydraulic cement*. ASTM International.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008a). *SNI 03-1970-2008: Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008b). *SNI 1972:2008 Cara uji slump beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7656:2012 Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 7064:2014 Semen Portland komposit*. Badan Standardisasi Nasional.
- Gumelar, F., & Nuraini, R. (2020). Bakteri *Bacillus subtilis* sebagai agen self-healing concrete dengan variasi persentase dan nilai pH. *Jurnal Rekayasa*, 10(2), 142–152.
- Hasratia, W. N., Subaer, S., & Husain, H. (n.d.). *Pembuatan agregat beton geopolimer sebagai self-healing concrete menggunakan Bacillus subtilis*.
- Kokate, V. B., & Kumar, S. R. (2022). Performance evaluation of rice-husk ash based bacterial concrete. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology*, 14(2), 178–182.
- Suardi, R., Hasbi, 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.

- SNI 1969:2008. (2008). *Metode uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- Sutama, A., Septriansyah, V., & Irawan, T. (2025). Pengaruh penggunaan abu sekam padi sebagai material substitusi sebagian semen terhadap workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton. *Jurnal Deformasi*, 10(1), 99–109.
- Techo, A., Kaewpikul, D., Sata, V., Tanapongpisit, N., Wongprasod, S., Saenrang, W., Chainakun, P., Chindaprasirt, P., & Ekprasert, J. (2024). Enhanced mechanical and self-healing properties of rice husk ash-incinerated sugarcane press mud biogeopolymer pastes. *Scientific Reports*, 14(1), 28121.
- Tie, Y., Ji, Y., Zhang, H., Jing, B., Zeng, X., & Yang, P. (2024). Investigation on the mechanical properties of *Bacillus subtilis* self-healing concrete. *Heliyon*, 10(14).