

JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

Teknik Sipil dan Perencanaan

PENGARUH BAKTERI *BACILLUS MEGATERIUM* SEBAGAI SELF-HEALING AGENT PADA KUAT TEKAN BETON DENGAN AGREGAT BUATAN BERBASIS LIMBAH *FLY ASH*

Fikkry Agustiansyah¹, Raya Syah Adzani¹, Luthfi Muhammad M^{1*}, Linda Aisyah¹

^{1*}) Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung.
Email Penulis Korespondensi: luthfi-mm@polban.ac.id
Nomor HP Penulis Korespondensi: 087824446909

ABSTRACT

*In the construction world, there exist an innovation to make use of artificial aggregates to reduce using natural aggregates that are limited in nature, but their usage usually lowers the concrete's compression strength. That is why the innovation of utilizing bacteria as a healing agent can be used for its self-healing property to fix cracks formed on the concrete. In this study, the bacteria *bacillus megaterium* were used as a healing agent with a percentage of 2% of the composition of the water used and artificial aggregate with the optimal composition of 60% type F fly ash : 40% of the inorganic compound calcium hydroxide with a water content of 37,7% of the weight of fly ash used. The artificial aggregate is made using the pan granulator method and water is sprayed evenly during its production. The compression test of the concrete is done with samples at the size of 100 x 200 mm and 150 x 300 mm on 28 days of age. In this study, 4 variables of fly ash are compared which are 100%, 100% with 2% bacteria, 50% with 2% bacteria, and normal concrete. The compression strength results at 28 days of age in order are 15,27 MPa, 22,16 MPa, 21,57 MPa, and 22,61 MPa. After 30 days of healing, the average compressive strengths of the specimens were 11,8 MPa, 14,45 MPa, 27,33 MPa, and 12,6 MPa, with healing efficiencies of 58,58%, 67,72%, 123,33%, and 48,08%, respectively.*

Keyword: Artificial aggregate, *Bacillus megaterium*, Fly ash, Self-healing concrete

1. PENDAHULUAN

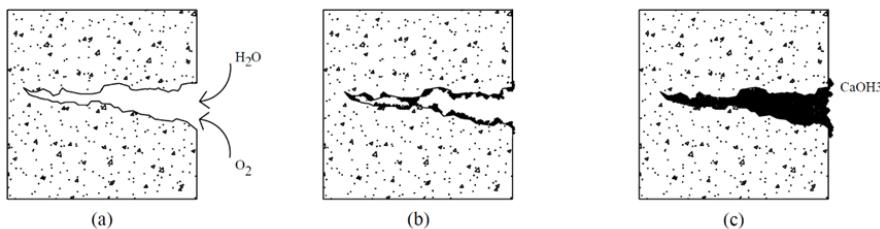
Penggunaan agregat alam pada beton dapat mencapai 70% s.d. 80% dari volume total beton di mana sekitar 45% terdiri dari agregat kasar [1]. Agregat kasar yang diambil dari alam termasuk bahan alam yang tidak dapat diperbarui sehingga memiliki jumlah yang terbatas. Solusi dari masalah ini adalah dengan mengganti agregat kasar konvensional dengan alternatif lain, salah satunya dengan memanfaatkan material pozzolan seperti limbah *fly ash* hasil pengolahan batu bara sebagai agregat buatan. Pada tahun 2022 dihasilkan sebanyak 70 juta ton *fly ash* oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) dalam pemenuhan energi listrik nasional [2]. Bahan yang mempunyai sifat pozzolan akan mengikat senyawa sisa hasil hidrasi semen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang tidak mempunyai kemampuan mengikat, menjadi senyawa baru yang mempunyai sifat mengikat sehingga meningkatkan kekuatan beton yang dihasilkan [3]. Akan tetapi penggunaan limbah *fly ash* sebagai agregat buatan pada beton memiliki kekurangan pada nilai kuat tekan yang rendah jika tidak menggunakan semen, sehingga memiliki risiko keretakan yang tinggi. Pada penelitian sebelumnya, beton yang menggunakan agregat buatan berbahan *fly ash* dan alkali aktivator (Na_2SiO_3 dan NaOH) hanya memiliki kuat tekan sebesar 12,05 MPa dibandingkan beton yang menggunakan agregat buatan berbahan *fly ash* dan semen tipe I yang memiliki nilai kuat tekan 24,76 MPa [4].

Dalam satu penelitian [5] digunakan senyawa kalsium hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada campuran mortar 100% *fly ash* untuk meningkatkan kuat tekannya. Dengan komposisi *fly ash* tipe F 60% dan kalsium hidroksida 40% ditambahkan *superplasticizer* 0,6% didapatkan nilai kuat tekan pada umur 28 hari 25,95 MPa. Berdasarkan penelitian tersebut, material *fly ash* dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dapat menghasilkan campuran berbasis *fly ash* yang memiliki kuat tekan yang baik tanpa penambahan penggunaan semen. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan diterapkan hal tersebut pada agregat buatan yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Agregat buatan dibuat menggunakan *pan granulator* yang menggunakan putaran sendok serta kemiringan alat agar bahan dasar dapat bergranulasi membentuk butiran agregat buatan.



Gambar 1. Hasil agregat buatan

Selain penggunaan agregat dari alam, beton memiliki kelemahan yaitu rentan mengalami retak karena sifatnya yang getas (*brittle*) dan lemah dalam menangani beban tarik [6]. Salah satu solusi untuk masalah tersebut adalah inovasi *self-healing concrete*, yaitu beton yang memiliki kemampuan untuk memperbaiki sendiri retakan-retakan yang terjadi dengan memanfaatkan *healing agent* bakteri yang memiliki sifat alkalinitas tinggi untuk dapat bertahan hidup di lingkungan ekstrem seperti beton [7].

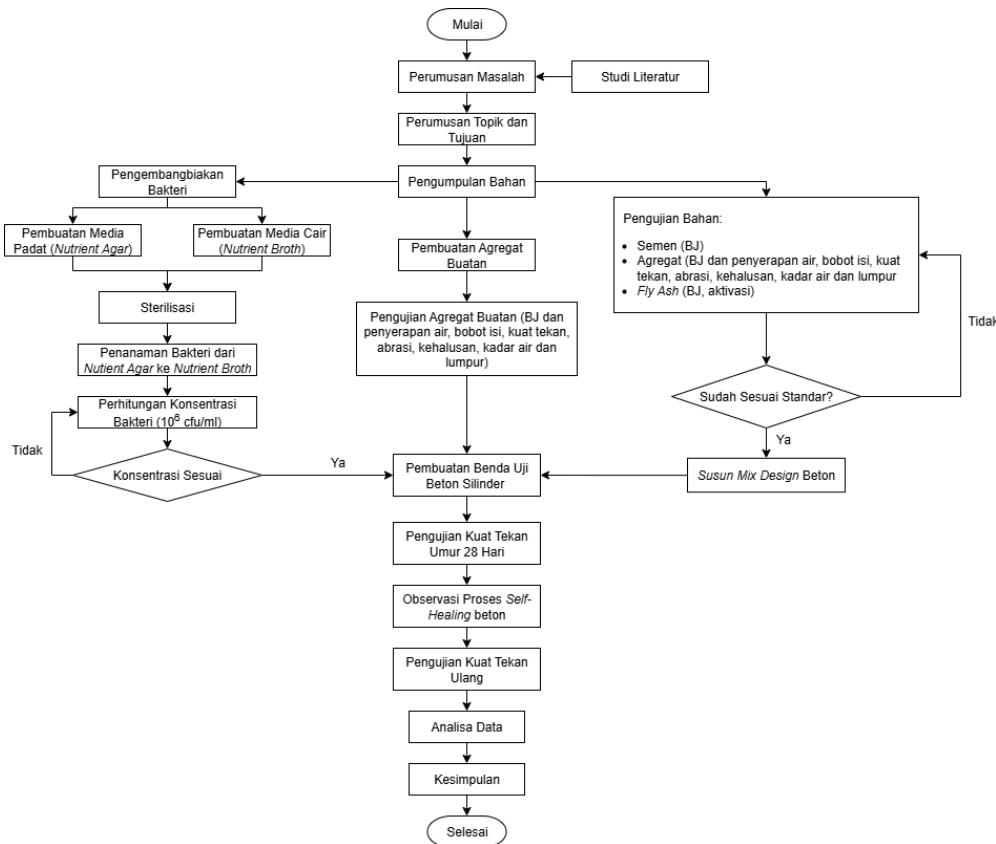


Gambar 2. Proses *Self-Healing Concrete* menggunakan *healing agent* bakteri

Dengan penggunaannya bakteri sebagai *healing agent*, kuat tekan beton dapat meningkat hingga 25-30% [8]. Salah satu contoh dari bakteri tersebut adalah bakteri *bacillus megaterium* yang dapat mengubah urea menjadi amonia dan karbon dioksida. Karbon dioksida yang dihasilkan oleh bakteri bereaksi dengan ion pada kalsium laktat dan membentuk endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang dapat mengisi pori-pori beton sehingga porositas beton dapat berkurang [9]. Sebelumnya telah dilakukan penelitian mengenai kadar optimal bakteri *bacillus megaterium* sebagai *healing agent* dalam campuran beton yaitu sebesar 2% dari komposisi air yang digunakan dan kalsium laktat sebesar 2% dari komposisi semen [10]. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan bakteri *bacillus megaterium* dengan harapan untuk mengatasi masalah tersebut dan meningkatkan kuat tekan beton yang berbahan agregat buatan dengan bahan dasar *fly ash*. Bakteri yang digunakan sebesar 2% dari komposisi air yang digunakan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di laboratorium bahan Politeknik Negeri Bandung dengan alur penelitian yang dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

2.1 Pembuatan dan Pengujian Benda Uji Beton

Dalam penelitian, pembuatan benda uji beton sesuai dengan mix design yang telah dirancang sesuai standar ACI 211.1-91 dengan mutu rencana $f'c = 20$ MPa. Benda uji beton yang sudah dibuat didiamkan dalam cetakan selama 24 jam lalu dikeluarkan dan direndam dalam air selama 28 hari. Pengujian pada benda uji beton dilakukan sesuai dengan standar pengujian pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Standar Pengujian Beton

No	Jenis Pengujian	Metode
1	Kuat Tekan	SNI 03-1974-2011
2	Kuat Tekan Ulang setelah <i>self-healing</i> (58 hari setelah uji kuat tekan pertama)	SNI 03-1974-2011
3	<i>Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (SEM/EDS)	ASTM E2809-22

2.2 Pengujian Kuat Tekan

Besar beban yang dapat dipikul dihitung sampai benda uji terjadi keretakan. Pada penelitian ini digunakan nilai kuat tekan beton dari benda uji silinder yang berumur 28 hari menggunakan mesin tekan digital.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana:

$f'c$ = Kuat tekan (MPa)

P = Maksimum beban tekan (N)

A = Luas permukaan benda uji (mm^2)

(Sumber: SNI 03-1974-2011)

2.2 Pengujian Kuat Tekan Pasca *Self-healing*

Pengujian kuat tekan ulang dilakukan pada hari ke-30 setelah kuat tekan awal untuk membandingkan nilai kuat tekan setelah crack-healing. Pengujian dilakukan dengan standar SNI 03-1974-2011 tentang cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder menggunakan mesin kuat tekan digital kembali.

$$\text{Persentase dari nilai awal (\%)} = \frac{\text{Kuat tekan sisa}}{\text{Kuat tekan awal}} \quad (2)$$

3. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik *Fly Ash*, Semen, Agregat Kasar, Halus dan Buatan

Keseluruhan analisa dari hasil pengujian bahan dasar beton yang sudah dilakukan yaitu pengujian *fly ash*, semen, agregat kasar, halus dan buatan dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 2. Pengujian Bahan Dasar Beton

No.	Nama Pengujian	Spesifikasi	Agregat Halus	Agregat Kasar	Agregat Buatan	Semen	<i>Fly Ash</i>
1	Keaktifan <i>Vicat</i>	≤ 2	-	-	-	-	≤ 2
2	Berat Jenis Semen	3 – 3,2	-	-	-	2,97	2,53
3	Berat Jenis Kering Muka (SSD)	2,5 – 2,7	2,56	2,57	2,05	-	-
4	Berat Jenis Kering (Curah)	-	2,5	2,5	1,73	-	-
5	Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>)	$\geq 2,5$	2,5	2,67	2,55	-	-
6	Penyerapan Air	≤ 3	2,16	2,6	18,64	-	-
7	Kadar Lolos Ayakan No.200	≤ 1 (kasar) ≤ 5 (halus)	13,9	2,9	-4,3	-	-
8	Kadar Air	0,5 – 2	1,87	2,6	19,19	-	-
9	Analisa Ayak (<i>Fineness Modulus</i>)	2,3 – 3,1	4,741	8,403	3,184	-	-
10	Uji Ketahanan dengan Tekanan 400 KN	< 30	-	13,8	36,64	-	-
11	Keausan Dengan Mesin Los Angeles	< 50	-	19,97	76,04	-	-
12	Bobot Isi Padat	1,4 – 1,9	1,67	1,43	1,22	-	-
13	Bobot Isi Gembur	1,4 – 1,9	1,54	1,23	1,07	-	-

Sumber: Hasil Analisis, 2025

3.2 Mix Design Beton

Dari hasil pengujian bahan dasar beton dapat dibuat *mix design* untuk masing-masing komposisi beton sebagai berikut.

Tabel 3. *Mix Design* untuk Pembuatan 1 m³ Beton

Kode	Air (liter)	Semen (kg)	Pasir (kg)	Agregat Kasar (kg)		Kalsium Laktat (liter)	Bakteri (liter)
				Alami	Buatan		
BK	199	398	686,59	872,3	0	0	0
BK ₁₀₀	199	398	711,9	0	692,9	0	0
B ₅₀	199	398	699,26	391,3	391,3	7,09	3,98
B ₁₀₀	199	398	711,9	0	692,9	7,09	3,98

3.3 Hasil Pengujian Tekan Beton

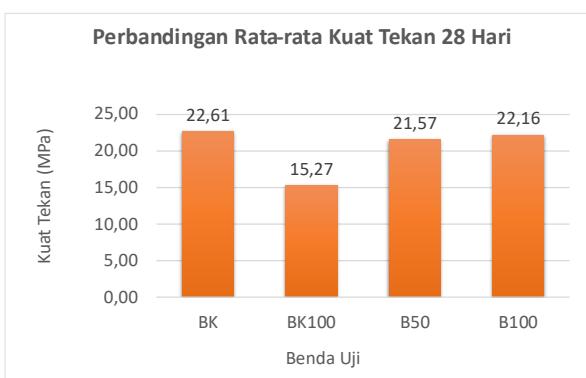
Dari hasil pengujian kuat lentur beton didapatkan data dari masing-masing komposisi benda uji beton sebagai berikut.

Tabel 4. Pengujian Kuat Tekan Beton

No .	Kode	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
1	BK1	20,1	
2	BK2	27,3*	22,61
3	BK3	25,1	
4	BK ₁₀₀ 1	10,5*	
5	BK ₁₀₀ 2	15,0	
6	BK ₁₀₀ 3	16,3	15,27
7	BK ₁₀₀ 4	29,2*	
8	BK ₁₀₀ 5	14,6	
9	B ₅₀ 1	20,3	
10	B ₅₀ 2	22,0	21,57
11	B ₅₀ 3	22,4	
12	B ₁₀₀ 1	29,0*	
13	B ₁₀₀ 2	24,3	
14	B ₁₀₀ 3	19,2	22,16
15	B ₁₀₀ 4	22,9	

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Ket: *data terlalu jauh dibandingkan sampel lain untuk dimasukan ke dalam rata-rata



Gambar 4. Hasil Kuat Tekan Beton

Pada umur 28 hari, didapatkan nilai kuat tekan benda uji BK, BK₁₀₀, B₅₀, dan B₁₀₀ didapatkan nilai kuat tekan sebesar 22,61 MPa, 15,27 MPa, 21,57 MPa, dan 22,16 MPa. Dibandingkan dengan BK, B₅₀ memiliki hasil nilai kuat tekan 4,59% lebih rendah dan B₁₀₀ memiliki hasil nilai kuat tekan 1,99% lebih rendah. Sedangkan, dibandingkan dengan BK₁₀₀, B₅₀ memiliki hasil nilai kuat tekan 41,26% lebih tinggi dan B₁₀₀ memiliki hasil nilai kuat tekan 45,12% lebih tinggi.

Dari hasil pengujian tersebut dapat terlihat penambahan bakteri *bacillus megaterium* dengan konsentrasi 2% dapat menaikan mutu kuat tekan beton dengan agregat buatan berbasah limbah *fly ash* hingga 45,12%. Hal ini bisa didasari oleh penggunaan material agregat buatan yaitu limbah *fly ash* dan CaOH₂ yang dapat memengaruhi kuat tekan beton dan tingginya kadar alkali pada *fly ash* yang merupakan lingkungan yang optimal untuk memicu terbentuknya endapan kalsium karbonat oleh bakteri *bacillus megaterium* dengan lebih cepat.

3.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Pasca *Self-healing*

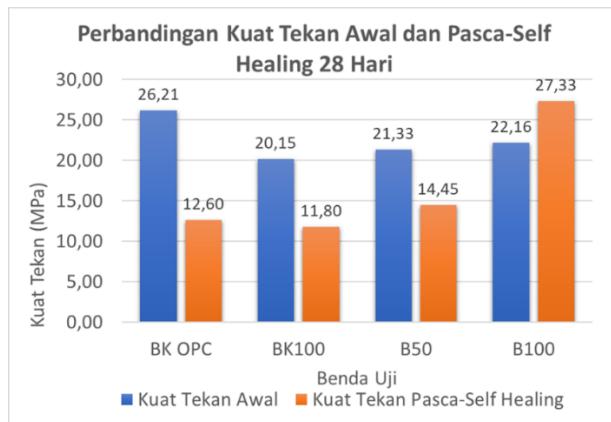
Setelah dilakukan pengujian kuat tekan pada umur 28 hari, benda uji kemudian diikat menggunakan benang dan dilakukan perendaman atau *curing* untuk mengaktifasi bakteri yang dalam kondisi dorman atau mati suri. Pengujian kuat tekan ulang beton dilakukan setelah proses self-healing pada hari ke-30. Pengujian ini dilakukan pada sampel kuat tekan BK, BK₁₀₀, B₅₀ dan B₁₀₀ yang telah dilakukan uji kuat tekan pada umur 28 hari.

Tabel 5. Pengujian Kuat Tekan Pasca *Self-healing* Beton

No	Kode	Kuat Tekan (MPa)		Rata-rata Kuat Tekan (MPa)		Percentase dari Nilai Awal (%)
		Awal	Pasca <i>Self-healing</i>	Awal	Pasca <i>Self-healing</i>	
1	BK1	20,12*	18,31*			
2	BK2	27,32	10,24	26,21	12,60	48,08
3	BK3	25,10	14,96			
4	BK ₁₀₀ 1	10,51*	10,53*			
5	BK ₁₀₀ 2	14,95	9,95			
6	BK ₁₀₀ 3	16,29	13,29	20,15	11,80	58,58
7	BK ₁₀₀ 4	29,19	18,52			
8	BK ₁₀₀ 5	14,56*	14,67*			
9	B ₅₀ 1	20,30	13,43			
10	B ₅₀ 2	22,05*	9,76*	21,33	14,45	67,72
11	B ₅₀ 3	22,36	15,46			
12	B ₁₀₀ 1	29,02*	18,88*			
13	B ₁₀₀ 2	24,34	29,41			
14	B ₁₀₀ 3	19,24	25,54	22,16	27,33	123,33
15	B ₁₀₀ 4	22,89	27,03			

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Ket: * data yang terlalu jauh/dekat dengan kuat tekan awal dibandingkan sampel lain tidak dimasukan ke dalam rata-rata



Gambar 5. Hasil Kuat Tekan Pasca *Self-healing* Beton

Data yang digunakan merupakan nilai kuat tekan dengan nilai interval yang rasional. Contohnya pada BK₁₀₀ di mana sampel 1 dan 5 memiliki nilai kuat tekan pasca *self-healing* mendekati nilai kuat tekan awal, sedangkan sampel 2, 3, dan 5 tidak. Oleh karena itu, rata-rata dihitung berdasarkan data mayoritas. Dari semua spesimen yang diuji kuat tekan ulang, *recovery strength* dari benda uji B₅₀ adalah sekitar 85,24% dan dari benda uji B₁₀₀ adalah sekitar 123,33%. Berikut merupakan komposisi beton dengan nilai persentase terdekat nilai kuat tekan pasca self-healing (*recovery strength*) dibandingkan kuat tekan awal beton.

4. KESIMPULAN

Pengaruh dari penggunaan agregat buatan berbasis limbah *fly ash* dan bakteri *bacillus megaterium* pada beton normal dengan mutu f'c 20 MPa pada umur 28 hari menghasilkan kuat tekan yang setara dengan beton normal dengan nilai kuat tekan masing-masing benda uji BK, B₅₀, dan B₁₀₀ yaitu 22,61 MPa,

21,57 MPa, dan 22,16 MPa. Hasil dari pengujian kuat tekan ulang pasca *self-healing* menunjukkan benda uji dengan nilai kuat tekan paling optimal adalah benda uji B₁₀₀ dengan persentase 123,33% dari nilai kuat tekan awalnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hujiyanto, I. Lakawa, Hakiman, dan M. Y. Paembonan, "Analisis Pengaruh Ukuran Maksimum Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan dan Porositas Pada Beton Normal," *Sultra Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 2, hlm. 384–397, Okt 2024, Diakses: 4 Februari 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal-unsultra.ac.id/index.php/scej/article/view/676>
- [2] Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Capaian Kinerja 2021 dan Rencana 2022 Sub. Sektor Ketenagalistrikan." Diakses: 23 Maret 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.esdm.go.id/>
- [3] I. N. Fatimah, A. S. Budi, dan S. Sangadji, "Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Pada High Volume Fly Ash-Selfcompacting Concrete (HVFA-SCC) Benda Uji D 15 Cm X 30 Cm Usia 28 Hari," *Matriks Teknik Sipil*, vol. 6, no. 3, hlm. 508–512, 2018, doi: <https://doi.org/10.20961/mateksi.v6i3.36559>.
- [4] A. C. Purnama dan J. J. Ekaputri, "Penggunaan Fly Ash sebagai Agregat Buatan Pengganti Agregat Alami pada Campuran Beton," *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, vol. 5, no. 2, hlm. 107–20, Apr 2021, doi: 10.12962/j26151847.v5i2.14498.
- [5] K. Setiono, N. Christiono, Antoni, dan D. Hardjito, "Pengaruh Penggantian Sebagian Fly Ash dengan Berbagai Kalsium Hidroksida terhadap Karakteristik Mortar 100% Fly Ash," *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, hlm. 170–177, 2019, Diakses: 2 Januari 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-sipil/article/view/9469>
- [6] Bunyamin, M. Hady, N. Hendrina, dan A. Syakir, "Analisis Kuat Tekan Beton Menggunakan Bahan Substitusi Serat Roving dan Cangkang Tiram," *Jurnal Serambi Engineering*, vol. VIII, no. 3, hlm. 6104–6114, Mei 2023, Diakses: 7 Februari 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://www.researchgate.net/publication/375891863_Analisis_Kuat_Tekan_Beton_Menggunakan_Bahan_Substitusi_Serat_Roving_dan_Cangkang_Tiram/fulltext/656148e9b86a1d521b0567aa/Analisis-Kuat-Tekan-Beton-Menggunakan-Bahan-Substitusi-Serat-Roving-dan-Cangkang-Tiram.pdf?origin=scientificContributions
- [7] P. V. Y. Reddy, B. Ramesh, dan L. P. Kumar, "Influence of bacteria in self healing of concrete - a review," *Mater Today Proc*, vol. 33, hlm. 4212–4218, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.233>.
- [8] P. Mohanadoss dkk., "Bioconcrete Strength, Durability, Permeability, Recycling and Effects on Human Health: A Review," dalam *Proceedings of. 3rd International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering ACSM 2015*, Mei 2015. doi: 10.15224/978-1-63248-062-0-28.
- [9] I. Rochani, A. Prasetyo, dan A. Kurniawan, "Pemanfaatan Batu Apung (Pumice) Lombok dan Bakteri (Bacillus Subtilis) sebagai Agent Perbaikan Kerusakan Retak pada Beton," *Majalah Geografi Indonesia*, vol. 30, hlm. 49–57, 2016. Diakses: 19 Januari 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.ugm.ac.id/mgi/article/view/15629>
- [10] L. Fauziah, S. M. Murhayati, L. M. Mauludin, dan L. Aisyah, "Pengaruh Bakteri Bacillus Megaterium sebagai Self-Healing Agent pada Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 3, 2023, doi: 10.26760/rekaracana.
- [11] P. Shakhshiri, "Lime: Calcium Oxide-CaO," *Scifun Chemical of the Week*, 2003.
- [12] J. Zhang dan B. Leng, "Transition from Multiple Macro-Cracking to Multiple Micro-Cracking in Cementitious Composites," *Tsinghua Sci Technol*, vol. 13, no. 5, hlm. 669–673, 2008, doi: [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(08\)70106-8](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(08)70106-8).
- [13] A. N. Heryani, A. Supriyanto, dan Ni'matuzahroh, "Studi Viabilitas dan Pola Pertumbuhan Bacillus Megaterium pada Konsentrasi Molase dan Waktu Inkubasi yang Berbeda," *Jurnal Ilmiah Biologi FST*, vol. 3, hlm. 12–0, Jan 2015.