

PEMANFAATAN *ECO PROCESSED POZZOLAN* SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN DALAM PEMBUATAN BETON TERHADAP PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON

Vanesa Elfidia Chairunnisa¹, Anggi Rahmad Zulfikar²
D4 Teknik Sipil, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya
E-mail: *vanesaelfidia.21054@mhs.unesa.ac.id¹, anggizulfikar@unesa.ac.id²

ABSTRAK

Produksi semen Portland (OPC) menyumbang emisi karbon dioksida yang signifikan, sehingga diperlukan bahan substitusi ramah lingkungan seperti Eco Processed Pozzolan (EPP), hasil pemurnian Spent Bleaching Earth (SBE) limbah industri kelapa sawit. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh substitusi EPP (0%, 5%, 10%, 15%) terhadap kuat tekan beton mutu f'_c 25 MPa menggunakan metode eksperimental dengan benda uji silinder 15 x 30 cm pada umur 7, 14, dan 28 hari (36 sampel). Hasil menunjukkan nilai slump menurun konsisten seiring bertambahnya kadar EPP (14 cm menjadi 12 cm). Pada umur 7 dan 14 hari, kuat tekan variasi 5% dan 10% EPP lebih rendah dari kontrol, namun pada umur 28 hari seluruh variasi EPP melampaui kontrol, dengan nilai tertinggi pada substitusi 15% sebesar 34,3 MPa (naik 38,31% dari 24,8 MPa). Peningkatan ini disebabkan reaksi pozzolanik yang optimal pada umur matang. Kadar substitusi optimum belum diperoleh karena kuat tekan masih terus meningkat hingga kadar tertinggi yang diuji.

Kata kunci

Eco Processed Pozzolan, substitusi semen, kuat tekan beton.

ABSTRACT

Portland cement (OPC) production contributes significant carbon dioxide emissions, driving the need for eco-friendly substitutes such as Eco Processed Pozzolan (EPP), derived from Spent Bleaching Earth (SBE), a palm oil industry waste. This study examines the effect of EPP substitution (0%, 5%, 10%, 15%) on the compressive strength of f'_c 25 MPa concrete using an experimental method with 15 x 30 cm cylindrical specimens tested at 7, 14, and 28 days (36 samples). Results show a consistent slump decrease with increasing EPP content (14 cm to 12 cm). At 7 and 14 days, 5% and 10% EPP variations showed lower strength than the control, but at 28 days all EPP variations exceeded the control, with the highest value at 15% substitution (34.3 MPa, a 38.31% increase from 24.8 MPa). This improvement results from optimal pozzolan reaction at mature age. The optimum substitution level remains undetermined as strength continued increasing at the highest tested content.

Keywords

Eco Processed Pozzolan, cement substitution, concrete compressive strength.

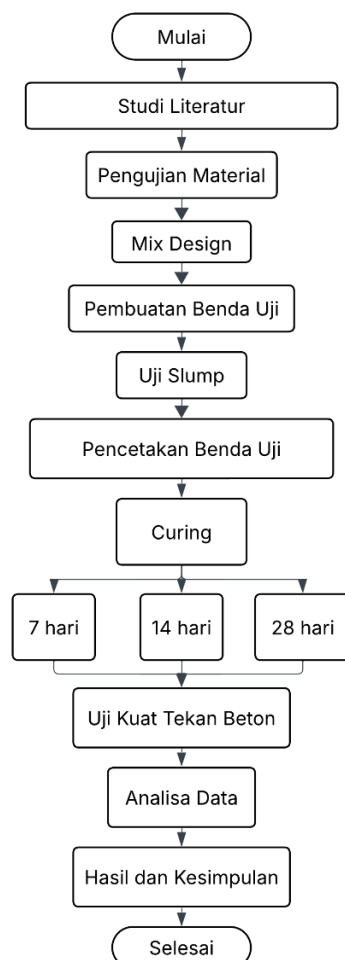
1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia yang terus berkembang membuat beton tetap menjadi material konstruksi utama karena kekuatan tekan, kemudahan pembentukan, dan durabilitasnya (International Energy Agency, n.d.). Namun, ketergantungan tinggi pada Ordinary Portland Cement (OPC) sebagai bahan pengikat membuat produksi semen ikut meningkat seiring urbanisasi dan pertumbuhan populasi global (Luhar et al., 2026). Padahal, sektor semen menyumbang sekitar 5% emisi CO₂ global dan menghasilkan sekitar 900 kg CO₂ per ton semen (Abdollahi et al., 2018), akibat proses kalsinasi bersuhu tinggi (1500–2000°C) yang umumnya masih mengandalkan bahan bakar fosil (Akter & Hawas, 2025).

Salah satu solusi untuk menekan emisi karbon tersebut adalah substitusi sebagian semen dengan bahan pozolan atau Supplementary Cementitious Materials (SCMs), yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan penguat beton (Leading Decarbonization of the Cement Industry, n.d.). Dalam konteks ini, berkembang material ramah lingkungan bernama Eco Processed Pozolan (EPP), hasil optimalisasi pemrosesan pozolan alami atau limbah industri, yang diklaim mampu menurunkan jejak karbon 70–95% dibandingkan produksi klinker konvensional sekaligus lebih efisien energi (Leading Decarbonization of the Cement Industry, n.d.; Thomas et al., n.d.).

Meski demikian, substitusi semen dengan EPP berpotensi mengubah mikrostruktur pasta semen — terutama tingkat kepadatan dan porositas interfasi — yang pada akhirnya memengaruhi kuat tekan beton, dengan risiko perlambatan laju kuat tekan awal apabila kadar substitusi tidak tepat. Oleh karena itu, diperlukan penelitian eksperimental untuk memetakan pengaruh variasi persentase EPP terhadap kuat tekan beton dan menentukan titik substitusi optimum, guna mendukung data ilmiah bagi pengembangan konstruksi hijau ke depan.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1: Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan pendekatan. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton (SBB). Berikut alur penelitian :

2.1 Tahap 1 (Persiapan)

Tahap pertama penelitian ini mencakup persiapan yang meliputi kajian literature serta mempersiapkan alat dan bahan yang dibutuhkan, termasuk EPP, semen, agregat halus dan kasar, dan air.

2.2 Tahap 2 (Uji Material dan Mix Design)

Pada Uji material ini meliputi uji semen, agregat halus dan kasar, uji silica fume.

- a. Pengujian Semen, meliputi : Uji konsistensi semen, waktu ikat semen, dan berat jenis semen.
- b. Pengujian Agregat halus dan Kasar, meliputi : Uji berat jenis agregat, uji gradasi agregat, uji berat isi agregat, uji kadar lumpur agregat, uji penyerapan air agregat.
- c. Pada penelitian ini meneliti variasi komposisi beton mutu normal dengan mensubstitusikan semen dengan EPP. Variabel bebas yang digunakan yaitu rasio substitusi EPP 0%, 5%, 10%, dan 15%. Sementara itu, variabel terikat yang diukur yaitu kuat tekan beton dengan mutu rencana 25 Mpa.

2.3 Tahap 3 (Pembuatan Sampel Beton)

- a. Campurkan semua bahan kering ke dalam mini mixer (Agregat halus dan kasar, Semen, EPP, Air).
- b. Mulai mix mixer dan secara bertahap tambahkan air hingga mencapai konsistensi yang diinginkan.
- c. Tuangkan campuran beton ke dalam cetakan silinder 15 x 30 cm yang telah diberi oli secara bertahap.
- d. Tuang campuran beton dengan 3x pengisian, setiap pengisian di rojok dan di pukul menggunakan palu karet, lakukan sebanyak 25 kali per bagian.
- e. Pastikan menuang beton pada cetakan tidak terlalu tinggi.
- f. Setelah beton terisi, ratakan permukaan cetakan dengan alat finishing seperti trowel hingga permukaan halus dan mulus.

2.4 Tahap 4 (Perawatan Sampel Beton)

Perawatan beton atau yang disebut curing bertujuan untuk mencegah beton kehilangan kandungan air dengan waktu yang cepat. Curing dilakukan dengan air tawar dalam kurun waktu 7 hari, 14 hari, dan 28 hari sesuai dengan umur pengujian benda uji. Sampel beton setelah dicetak di diamkan selama 1 hari di luar air dan curing dilakukan segera setelah pembukaan molding.

2.5 Tahap 5 (Pengujian Kuat Tekan Beton)

- a. Ambil benda uji yang usai di curing sesuai dengan umur yang diinginkan. Timbang benda uji untuk mengetahui beratnya. Dan catat hasil berat benda uji tersebut.
- b. Siapkan mesin kuat tekan beton dan tempatkan benda uji ke dalam mesin kuat tekan beton.
- c. Beban diterapkan bertahap hingga sampel beton pecah. Kecepatan penerapan harus konstan sekitar 0.2 Mpa per detik.
- d. Catat beban maksimum yang tertera sebelum benda uji rusak.
- e. Hitung kuat tekan beton.
- f. Lakukan secara berkala setiap variasinya hingga sampel benda uji habis teruji semua.

2.6 Tahap 6 (Pengolahan Data)

Tahap keenam dalam penelitian ini yaitu pengolahan data, yang disertai analisis hasil pengujian dan perbandingan data teoritis. Data yang diperoleh dari pengujian ini disajikan dalam format tabel dan grafik dan dijelaskan dengan bentuk kalimat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Uji Semen

Hasil Pengujian Material, pada pengujian ini semen yang digunakan yaitu Dynamix OPC Type 1. Pengujian dari semen ini sesuai dengan SNI 2049:2015. Berikut Hasilnya :

Tabel 1. Hasil Uji Semen

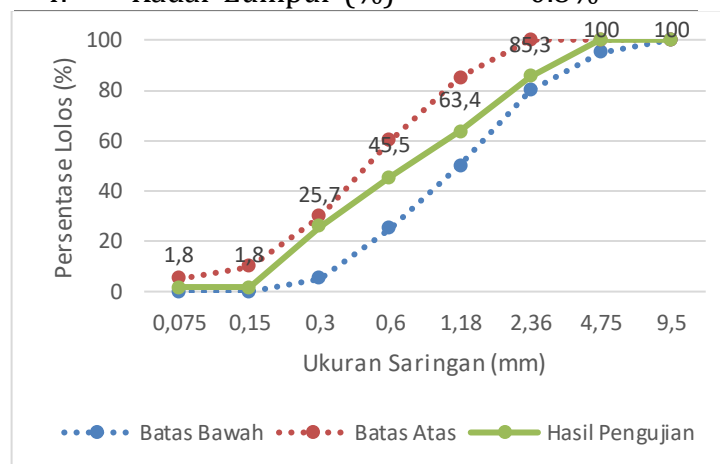
No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Konsistensi Normal	28.4 %
2.	Waktu Ikut	
	- Pengikatan Awal	46 menit
	- Pengikatan Akhir	140 menit
3.	Berat Jenis	3.03 gr/cm ³

3.2 Hasil Uji Agregat Halus

Agregat Halus yang digunakan yaitu berasal dari Lumajang dengan karakteristik berwarna hitam, Berikut hasil dari pengujian tersebut :

Tabel 2. Hasil Uji Agregat Halus

No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Berat Isi (gr/cm ³)	1.635 gr/cm ³
2.	Berat Jenis (gr/cm ³)	2.47 gr/cm ³
3.	Penyerapan Air (%)	1.01%
4.	Kadar Lumpur (%)	0.8%



Gambar 2: Grafik Uji Gradasi Agregat Halus

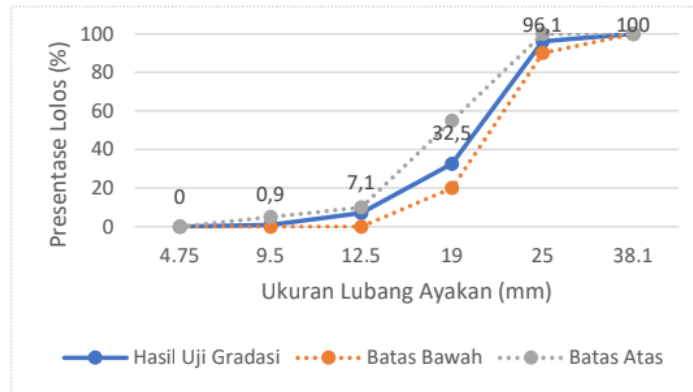
Uji gradasi ini sudah sesuai ASTM C.136. Pada grafik diatas menunjukkan bahwa agregat halus tersebut termasuk kategori pada zona II atau kategori sedang. Untuk agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini juga berasal dari Lumajang.

3.3 Hasil Uji Agregat Kasar

Uji agregat kasar ini meliputi uji berat jenis, uji gradasi, uji berat isi, uji kadar lumpur, dan uji penyerapan air.

Tabel 3. Hasil Uji Agregat Kasar

No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Berat Isi (gr/cm ³)	1.6 gr/cm ³
2.	Berat Jenis (gr/cm ³)	2.4 gr/cm ³
3.	Penyerapan Air (%)	1.07%
4.	Kadar Lumpur (%)	1 %



Gambar 3: Grafik Uji Gradasi Agregat Kasar

Grafik diatas menunjukkan grafik hasil uji gradasi agregat kasar, grafik tersebut menunjukkan bahwa batu pecah atau agregat kasar tersebut masuk ke dalam zona gradasi yang ditentukan, hingga batu pecah memenuhi syarat gradasi berdasarkan Gradasi No. 5 ASTM C-33.

3.4 Mix Design

Berdasarkan dari hasil trial and error terhadap berbagai variasi mix design, dan mix design ini dipilih karena sesuai dan memenuhi standar uji beton. Tabel mix design berikut mengacu pada SNI 03-2834-2000 dan hanya berlaku untuk volume trial 0,067 m³.

Komposisi Mix Design Volume 0,067				
f'c 25 MPa (kg)				
Kadar EPP	0%	5%	10%	15%
Semen	22,78	21,64	20,5	19,36
EPP	0	1,14	2,28	3,42
Pasir Lumajang	59,6	59,6	59,6	59,6
Split 5-12	45,12	45,09	45,09	45,09
Split 12-25	24,29	24,32	24,32	24,32
Air	9,22	9,22	9,22	9,22

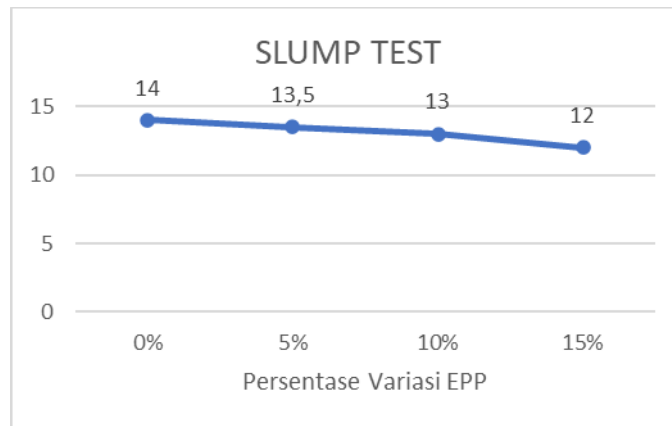
Gambar 4: Mix Design

3.5 Hasil Uji Slump

Hasil Pengujian ini dapat diketahui dengan cara melakukan pengujian pada beton segar yang mengacu pada pedoman EFNARC 2005. Berikut hasil pengujian beton segar slump beton :

Tabel 4. Hasil Uji Slump

EPP (%)	Slump (cm)
0%	14
5%	13,5
10%	13
15%	12



Gambar 5. Grafik Slump Test

Pada tabel 4 diperoleh nilai slump sebesar 14 cm untuk beton kontrol (0%), 13,5 cm untuk substitusi EPP 5%, 13 cm untuk substitusi 10%, dan 12 cm untuk substitusi 15%. Data tersebut menunjukkan bahwa nilai slump mengalami penurunan yang konsisten dan progresif seiring dengan meningkatnya persentase substitusi eco processed pozzolan, dengan penurunan berkisar antara 3,57% (5%) hingga 14,29% (15%) dibandingkan beton kontrol. Berikut hasil penimbangan benda uji umur 28 hari:

Tabel 5. Hasil Penimbangan Benda Uji

No	Jenis Beton	Hasil (kg)	Rata-rata (kg)
1	0% (1)	12,70	12,89
2	0% (2)	13,14	
3	0% (3)	12,84	
4	5% (1)	12,72	12,80
5	5% (2)	12,88	
6	5% (3)	12,80	
7	10% (1)	12,76	12,76
8	10% (2)	12,76	
9	10% (3)	12,76	
10	15% (1)	12,58	12,52
11	15% (2)	12,68	
12	15% (3)	12,30	

Berdasarkan hasil penimbangan berat benda uji silinder beton pada umur 28 hari (Tabel 5), diperoleh nilai rata-rata berat sebesar 12,89 kg untuk beton normal (0%), 12,80 kg untuk beton dengan substitusi eco processed pozzolan 5%, 12,76 kg untuk substitusi 10%, dan 12,52 kg untuk substitusi 15%. Data tersebut menunjukkan adanya kecenderungan penurunan berat benda uji yang bersifat progresif seiring dengan meningkatnya persentase substitusi eco processed pozzolan terhadap semen. Pengujian kuat tekan beton menggunakan pedoman ASTM C 39. Pengujian kuat tekan ini dilakukan pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Pada pengujian ini dilakukan menggunakan mesin Compressing Testing Machine (CTM) di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton. Mutu beton yang direncanakan yaitu mutu 25 Mpa. Berikut hasil uji kuat tekan beton berdasarkan umurnya :

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tekan Beton 7 Hari

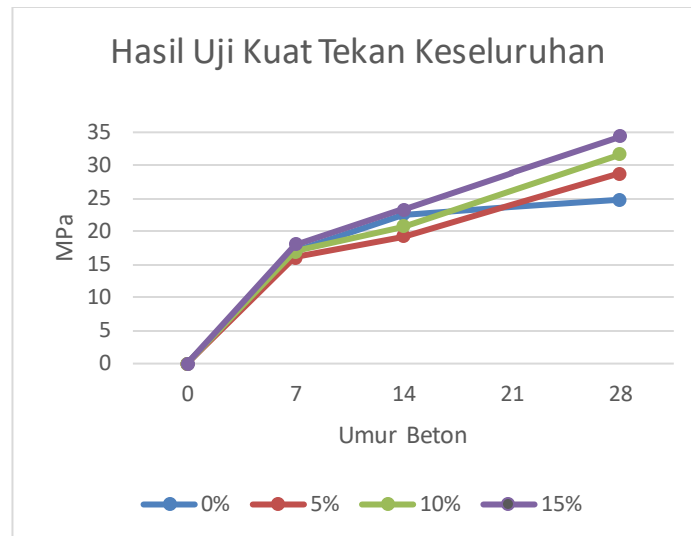
Umur Beton 7 Hari					
Jenis Beton	Benda Uji	P Maks (N)	Luas Permukaan (mm ²)	f _c (Mpa)	Rata-rata (Mpa)
Kontrol	0% (1)	3233884,5	176715,0	18,3	16,9
	0% (2)	3039498,0	176715,0	17,2	
	0% (3)	2668396,5	176715,0	15,1	
EPP	5% (1)	2827440,0	176715,0	16,0	14,8
	5% (2)	2845111,5	176715,0	16,1	
	5% (3)	2173594,5	176715,0	12,3	
	10% (1)	2951140,5	176715,0	16,7	16,1
	10% (2)	2968812,0	176715,0	16,8	
	10% (3)	2633053,5	176715,0	14,9	
	15% (1)	3163198,5	176715,0	17,9	18,0
	15% (2)	3163198,5	176715,0	17,9	
	15% (3)	3216213,0	176715,0	18,2	

Tabel 7. Hasil Uji Kuat Tekan Beton 14 Hari

Umur Beton 14 Hari					
Jenis Beton	Benda Uji	P Maks (N)	Luas Permukaan (mm ²)	f _c (Mpa)	Rata-rata (Mpa)
Kontrol	0% (1)	3799372,5	176715,0	21,5	22,5
	0% (2)	4011430,5	176715,0	22,7	
	0% (3)	4099788,0	176715,0	23,2	
EPP	5% (1)	3322242,0	176715,0	18,8	19,3
	5% (2)	3445942,5	176715,0	19,5	
	5% (3)	3481285,5	176715,0	19,7	
	10% (1)	3658000,5	176715,0	20,7	20,8
	10% (2)	3675672,0	176715,0	20,8	
	10% (3)	3711015,0	176715,0	21,0	
	15% (1)	3958416,0	176715,0	22,4	23,3
	15% (2)	4152802,5	176715,0	23,5	
	15% (3)	4241160,0	176715,0	24,0	

Tabel 8. Hasil Uji Kuat Tekan Beton 28 Hari

Umur Beton 28 Hari					
Jenis Beton	Benda Uji	P Maks (N)	Luas Permukaan (mm ²)	f _c (Mpa)	Rata-rata (Mpa)
Kontrol	0% (1)	4276503,0	176715,0	24,2	24,8
	0% (2)	4294174,5	176715,0	24,3	
	0% (3)	4559247,0	176715,0	25,8	
EPP	5% (1)	4859662,5	176715,0	27,5	28,8
	5% (2)	5089392,0	176715,0	28,8	
	5% (3)	5319121,5	176715,0	30,1	
	10% (1)	5425150,5	176715,0	30,7	31,6
	10% (2)	5637208,5	176715,0	31,9	
	10% (3)	5707894,5	176715,0	32,3	
	15% (1)	5796252,0	176715,0	32,8	34,3
	15% (2)	6167353,5	176715,0	34,9	
	15% (3)	6238039,5	176715,0	35,3	



Gambar 6: Grafik Uji Kuat Tekan Keseluruhan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari, dapat diamati perkembangan kekuatan tekan beton pada seluruh variasi substitusi eco processed pozzolan (EPP) secara menyeluruh terhadap fungsi waktu. Secara umum, grafik pada Gambar 6 menunjukkan bahwa seluruh variasi beton, baik kontrol maupun EPP, mengalami peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur, sebagaimana lazim terjadi pada proses hidrasi beton yang bersifat kontinu. Namun demikian, pola pertumbuhan kekuatan pada masing-masing variasi menunjukkan karakteristik yang berbeda dan mengalami titik silang (crossing point) yang menarik untuk dibahas.

Pada umur 7 dan 14 hari, kurva kuat tekan variasi 5% dan 10% berada di bawah kurva kontrol, sedangkan variasi 15% relatif sejajar atau sedikit di atas kontrol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada umur dini, efek dilusi semen (cement dilution effect) masih lebih dominan dibandingkan kontribusi reaksi pozzolanik yang belum berlangsung optimal.

Memasuki umur 28 hari, terjadi perubahan pola yang signifikan, di mana seluruh kurva EPP (5%, 10%, 15%) melampaui kurva kontrol, dengan urutan kuat tekan dari yang tertinggi ke terendah menjadi: 15% (34,3 MPa) > 10% (31,6 MPa) > 5% (28,8 MPa) > 0% (24,8 MPa). Perubahan posisi kurva ini secara visual terlihat jelas pada Gambar 6, di mana keempat garis yang semula saling berdekatan pada umur 7–14 hari kemudian "berpencar" dan berbalik urutan pada umur 28 hari, dengan variasi EPP yang lebih tinggi justru menunjukkan lonjakan kenaikan yang lebih tajam.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis dari penelitian ini menunjukkan bahwa Substitusi *Eco Processed Pozzolan* (EPP) pada kadar 5%, 10%, dan 15% terbukti meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari dibandingkan beton kontrol, dengan peningkatan berkisar 16,13% hingga 38,31% dan nilai tertinggi dicapai pada substitusi 15% sebesar 34,3 MPa, meskipun pada umur 7 dan 14 hari kadar 5% dan 10% sempat menunjukkan kuat tekan lebih rendah akibat efek dilusi semen sebelum reaksi pozzolanik berlangsung optimal; namun demikian, kadar substitusi optimum belum dapat ditentukan karena kuat tekan masih terus meningkat hingga kadar tertinggi yang diuji (15%), sehingga EPP tetap berpotensi digunakan sebagai substitusi sebagian semen yang ramah lingkungan sekaligus meningkatkan kinerja mekanik beton.

5. DAFTAR PUSTAKA

- International Energy Agency, I. (n.d.). *Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Retrieved www.wbcsdcement.org.
- Abdollahi, Zarei, + , & Zohreh. (2018). Reduction of CO₂ Emission and Production Costs by Using Pozzolans in Lamerd Cement Factory. In *J. Chem. Chem. Eng. Research Article* (Vol. 37, Number 1).
- Aİtcin, P. C. (2016). Portland cement. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 27–51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100693-1.00003-5>
- Akter, S. T., & Hawas, A. (2025). Current Insight on Eco-Friendly Concrete: A Review. In *Buildings* (Vol. 15, Number 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/buildings15050682>
- Ekolu, S. O., Dateling, J., & Naghizadeh, A. (2025). Performance of a kinetic model for predicting internal sulphate attack in Portland cement mortars. *Results in Chemistry*, 16, 102345. <https://doi.org/10.1016/J.RECHEM.2025.102345>
- Farahiyah, R., Rahman, A., Asrah, H., Rizalman, A. N., Mirasa, A. K., & Rajak, M. A. A. (2020). Study of Eco-Processed Pozzolan Characterization as Partial Replacement of Cement. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 8(3), 967–970. <http://www.jett.dormaj.com>
- Hasibuan, F., Kamel Wan Ibrahim, M., Faturahman, N., Nursassongko, A., Pratomo Arianto, N., & Badarudin. (2025). *ECO PROCESSED POZZOLAN, MATERIAL FOR THERMAL INSULATION*.
- Kusaimi, N. F. M., Hamzah, F., Jai, J., Zaki, N. A. M., & Ibrahim, N. (2020). Compressive strength and water absorption of pavement derived from palm oil eco processed pozzolan (Epp) material as partial cement replacement. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 20(2), 205–215. <https://doi.org/10.22146/ajche.60230>
- leading decarbonization of the cement industry. (n.d.). Retrieved www.cbsnews.com/news/cement-industry-co2-emissions-climate-change-brimstone/
- Luhar, S., Ashour, A., & Luhar, I. (2026). Decarbonising the Cement and Concrete Industry—A Step Forward to a Sustainable Future. In *Journal of Composites Science* (Vol. 10, Number 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcs10050226>
- Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung Badan Standardisasi Nasional, BSN 1 (2013). www.bsn.go.id
- Restu Amelia, J., Agustina Iryani, D., Hasanudin, U., Sugiharto, R., Br Ginting, S., & Indraningtyas, L. (2023). *Teknologi Pengelolaan Spent Bleaching Earth*. AURA.
- Sbahieh, S., McKay, G., Nurdawati, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2025). The sustainability of partial and total replacement of Ordinary Portland Cement: A deep dive into different concrete mixtures through life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 108, 112830. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2025.112830>
- Sinta Devi, D., Usman, F., & Nurhadi, M. F. (2025). Analisis Pemanfaatan Limbah Las Karbit sebagai Substitusi Sebagian Semen untuk Peningkatan Mutu dan Beton Berkelanjutan. *Jurnal Konstruksi*, 23(2). <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.23-2.3017>
- statistik-indonesia-2026. (n.d.).
- Tamuly, P., & Nava, V. (2025). Machine learning based conformal predictors for uncertainty-aware compressive strength estimation of concrete. *Construction and Building Materials*, 487, 141844.

<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.141844>
Thomas, J. E., Del, E., & Castillo, R. (n.d.). *NATURAL POZZOLANS-AN INTRODUCTION*.