

# Perilaku Lentur dan Dampak Lingkungan Mortar Berbasis Material Semen Tambahan (SCMs)

Abdullah Latip<sup>1</sup>, Herman Parung<sup>1</sup>, Muhammad Akbar Caronge<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Gowa 92171, Sulawesi Selatan, INDONESIA

\*Corresponding author: ma-caronge@unhas.ac.id

## INTISARI

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan material konstruksi yang berkelanjutan, mortar sebagai material yang secara luas digunakan perlu dievaluasi tidak hanya dari aspek mekanik, tetapi juga dampak lingkungannya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *supplementary cementitious materials* (SCMs), yaitu *recycled concrete powder* (RCP) dan *rice husk ash* (RHA), terhadap perilaku lentur, dampak lingkungan, dan kinerja keberlanjutan mortar. Variasi campuran yang digunakan meliputi kontrol, 15%RCP, 15%RHA, dan kombinasi 7,5%RCP+RHA. Pengujian beban lentur dilakukan menggunakan metode pembebanan satu titik dengan alat DYE-300S untuk memperoleh kurva beban-waktu secara otomatis. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan RHA mampu mempertahankan performa lentur mendekati kontrol, sedangkan RCP cenderung menurunkan kapasitas beban. Dari aspek lingkungan, seluruh variasi SCMs menunjukkan penurunan nilai *Global Warming Potential* (GWP) dan *Embodied Energy* (EE), dengan reduksi terbesar pada campuran 15%RHA. Analisis sustainabilitas menunjukkan bahwa nilai *eco-performance* tertinggi diperoleh pada variasi 15%RHA, yang mengindikasikan efisiensi terbaik antara performa mekanik dan dampak lingkungan. Dengan demikian, pemanfaatan RHA sebagai substitusi semen memberikan kontribusi optimal dalam pengembangan mortar berkelanjutan.

Kata kunci: Mortar, RCP, RHA, beban lentur, keberlanjutan.

## 1 PENDAHULUAN

Mortar merupakan material konstruksi yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pasangan bata, plesteran, dan elemen non-struktural lainnya. Kinerja mortar tidak hanya ditentukan oleh kekuatan tekan, tetapi juga oleh kemampuan dalam menahan tegangan tarik tidak langsung, seperti pada kondisi lentur (Aminul Haque dkk., 2020). Dalam praktiknya, kegagalan pada mortar sering kali diawali oleh retak akibat beban lentur, sehingga evaluasi terhadap perilaku lentur menjadi penting untuk memahami respons material secara menyeluruh. Selain aspek mekanik, perhatian terhadap dampak lingkungan material konstruksi juga semakin meningkat seiring dengan tuntutan pembangunan berkelanjutan.

Produksi semen sebagai komponen utama mortar diketahui memiliki kontribusi signifikan terhadap emisi karbon dan konsumsi energi global (Sathiparan dkk., 2022). Proses produksi klinker yang melibatkan suhu tinggi serta reaksi kalsinasi batu kapur menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> dalam jumlah besar, menjadikan industri semen sebagai salah satu penyumbang utama gas rumah kaca. Oleh karena itu, upaya untuk mengurangi penggunaan semen melalui pemanfaatan *supplementary cementitious materials* (SCMs) menjadi strategi yang relevan dalam menekan dampak lingkungan tanpa mengorbankan kinerja material.

Dalam konteks ini, *recycled concrete powder* (RCP) dan *rice husk ash* (RHA) merupakan dua jenis SCMs yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian semen. RCP berasal dari limbah beton yang telah dihancurkan dan diolah kembali, sehingga berkontribusi terhadap konsep ekonomi sirkular dalam konstruksi (Dughaishi dkk., 2026). Sementara itu, RHA merupakan limbah pertanian yang kaya akan silika amorf dan memiliki sifat pozzolanik, sehingga mampu berpartisipasi dalam reaksi hidrasi sekunder dan membentuk produk kalsium silikat hidrat (C-S-H) (García dkk., 2024). Penggunaan kedua material ini tidak hanya berpotensi meningkatkan efisiensi sumber daya, tetapi juga dapat mempengaruhi sifat mekanik dan mikrostruktur mortar, khususnya pada zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone*).

Meskipun demikian, karakteristik RCP dan RHA yang berbeda dapat menghasilkan respons mekanik yang tidak seragam, terutama pada perilaku lentur. RCP yang cenderung memiliki reaktivitas lebih rendah akibat proses hidrasi sebelumnya dapat mempengaruhi kualitas matriks dan ITZ, sedangkan RHA dengan kandungan silika reaktif dapat meningkatkan densifikasi struktur. Oleh karena itu, pengujian beban lentur menjadi penting untuk

mengevaluasi bagaimana variasi SCMs mempengaruhi kapasitas material dalam menahan beban hingga keruntuhan (Namakiaraghi dkk., 2025). Selain itu, hubungan antara beban lentur dan waktu pembebanan juga memberikan informasi mengenai mekanisme distribusi tegangan dan karakteristik keruntuhan, termasuk kecenderungan perilaku getas pada mortar.

Di sisi lain, evaluasi kinerja material tidak dapat dilepaskan dari aspek lingkungan. Parameter seperti *Global Warming Potential* (GWP) dan *Embodied Energy* (EE) banyak digunakan untuk mengukur dampak lingkungan suatu material dari tahap produksi hingga siap digunakan (*cradle to gate*) (Bennett dkk., 2022). Penggunaan SCMs diharapkan dapat menurunkan nilai GWP dan EE melalui pengurangan konsumsi semen. Namun, penilaian keberlanjutan yang komprehensif perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kinerja mekanik dan dampak lingkungan.

Konsep *eco-performance* atau kinerja keberlanjutan menjadi pendekatan yang relevan dalam mengintegrasikan kedua aspek tersebut. Parameter ini umumnya dinyatakan sebagai rasio antara performa mekanik terhadap dampak lingkungan, sehingga memberikan gambaran efisiensi material dalam menghasilkan kekuatan dengan beban lingkungan yang minimal (Bakka' dkk., 2024). Dengan demikian, analisis *eco-performance* memungkinkan identifikasi campuran mortar yang tidak hanya kuat secara mekanik, tetapi juga lebih ramah lingkungan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan RCP dan RHA sebagai pengganti sebagian semen terhadap perilaku lentur, dampak lingkungan, serta kinerja keberlanjutan mortar. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material mortar yang lebih efisien dan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah konstruksi dan pertanian.

## 2 METODE PENELITIAN

### 2.1 Material dan Komposisi Campuran

Material pengikat (binder) yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas *portland composite cement* (PCC), *recycled concrete powder* (RCP), dan *rice husk ash* (RHA). RCP diperoleh dari limbah pengujian di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, sedangkan RHA berasal dari hasil pembakaran sekam padi di Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Agregat halus menggunakan pasir lokal dari Sungai Jeneberang, Sulawesi Selatan. Air yang digunakan adalah air bersih yang memenuhi syarat pencampuran mortar. Nilai berat jenis masing-masing material meliputi PCC (3,11), pasir (2,46), RCP (2,54), dan RHA (2,07).

Komposisi campuran mortar dirancang dengan variasi substitusi sebagian semen menggunakan RCP dan RHA. Campuran kontrol menggunakan 100% PCC, sedangkan variasi lainnya meliputi 15%RCP, 15%RHA, dan kombinasi 7,5%RCP+RHA sebagai pengganti semen berdasarkan berat. Tabel 1 menunjukkan komposisi campuran mortar secara rinci untuk setiap variasi.

Tabel 1. Komposisi campuran mortar berbasis SCMs

Variasi	Semen (kg)	Pasir (kg)	Air (kg)	RCP (kg)	RHA (kg)
Kontrol	519,9	1429,7	251,6	0,0	0,0
15%RCP	441,9	1429,7	251,6	78,0	0,0
15%RHA	441,9	1429,7	251,6	0,0	78,0
7,5%RCP+RHA	441,9	1429,7	251,6	39,0	39,0

### 2.2 Beban Lentur

Pengujian beban lentur mortar dilakukan untuk mengevaluasi respons material terhadap pembebanan hingga mencapai beban maksimum. Benda uji yang digunakan berbentuk balok dengan dimensi  $40 \times 40 \times 160$  mm. Pengujian dilaksanakan menggunakan metode satu titik pembebanan dengan laju pembebanan sebesar 50 N/detik (Aminul Haque dkk., 2020) hingga benda uji mengalami keruntuhan. Nilai beban lentur yang diperoleh merupakan rata-rata dari tiga benda uji untuk setiap variasi campuran guna memastikan konsistensi hasil.

Pengujian menggunakan alat DYE-300S yang mampu merekam beban dan waktu secara otomatis selama proses pembebanan berlangsung, sehingga kurva hubungan beban–waktu dapat diperoleh secara langsung. Gambar 1 menampilkan benda uji dan *setup* pengujian lentur mortar.



Gambar 1. *Setup* pengujian perilaku lentur mortar.

### 2.3 Parameter Lingkungan dan Analisis Sustainibilitas

Parameter lingkungan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *Global Warming Potential* (GWP) dan *Embodied Energy* (EE) dengan batasan sistem *cradle to gate*. Nilai GWP dan EE untuk setiap material diperoleh dari penelitian terdahulu. Tabel 2 menampilkan nilai parameter lingkungan yang digunakan, yang disusun dalam format memanjang dengan baris berupa material, nilai GWP, nilai EE, dan referensi sumber. Perhitungan total dampak lingkungan dilakukan dengan mengalikan nilai parameter masing-masing material dengan massa material dalam campuran, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan (1) dan (2):

$$GWP_{total} = \sum(m_i \times GWP_i) \tag{1}$$

$$EE_{total} = \sum(m_i \times EE_i) \tag{2}$$

Keterangan:  $GWP_{total}$  adalah total GWP campuran (kgCO<sub>2</sub>-eq),  $EE_{total}$  adalah total EE campuran (MJ),  $m_i$  adalah massa masing-masing material dalam campuran (kg),  $GWP_i$  adalah nilai GWP per satuan massa material ke-i (kgCO<sub>2</sub>-eq/kg), dan  $EE_i$  adalah nilai EE per satuan massa material ke-i (MJ/kg).

Analisis sustainabilitas dilakukan dengan membandingkan kinerja mekanik terhadap dampak lingkungan. Parameter yang digunakan adalah rasio beban lentur terhadap GWP dan EE. Nilai ini mencerminkan efisiensi material dalam menghasilkan performa mekanik per unit dampak lingkungan. Perhitungan dilakukan menggunakan Persamaan (3) dan (4):

$$Eco - GWP = \frac{P}{GWP_{total}} \tag{3}$$

$$Eco - EE = \frac{P}{EE_{total}} \tag{4}$$

Keterangan:  $P$  adalah beban lentur maksimum.

Tabel 2. Parameter lingkungan material

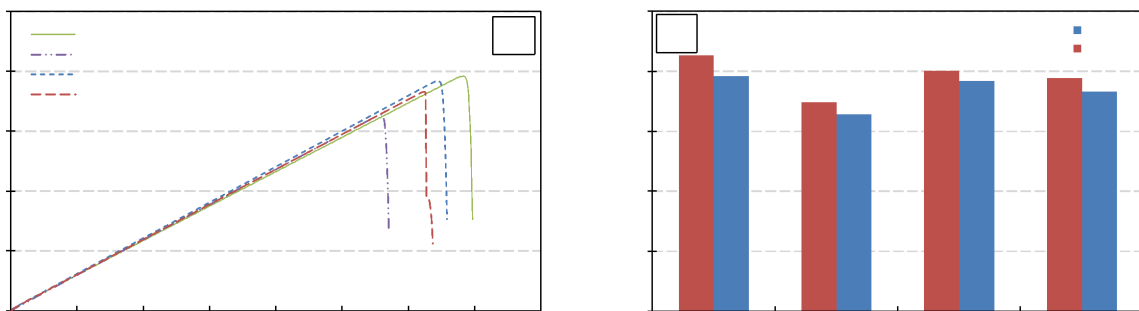
Parameter	Semen	RCP	RHA	Pasir	Air
GWP (kgCO <sub>2</sub> -eq/kg)	0,802	0,19	0,157	0,023	0
EE (MJ/kg)	3,01	1,71	0,353	0,341	0
Referensi	(Hu dkk., 2020)	(Real dkk., 2022)	(Hu dkk., 2020)	(Hossain dkk., 2016)	(Hossain dkk., 2016)

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hubungan Beban Lentur-Waktu

Gambar 2 (a) menunjukkan kurva beban lentur terhadap waktu pada campuran mortar berbasis SCMs. Pada variasi Kontrol, diperoleh beban lentur sebesar 1.959,20 N pada waktu 34,16 detik. Substitusi 15%RCP menghasilkan beban sebesar 1.640,28 N pada 27,90 detik yang ditandai dengan penurunan sebesar 16,28% terhadap variasi kontrol. Mortar dengan 15%RHA menunjukkan beban puncak sebesar 1.921,34 N pada 32,10 detik yang mengalami penurunan sebesar 16,28% dibandingkan variasi kontrol. Sementara itu, campuran 7,5%RCP+RHA menghasilkan beban sebesar 1.829,70 N pada 31,14 detik, terjadi penurunan sebesar 6,61% dibandingkan variasi kontrol. Gambar 1 (b) menampilkan perbandingan beban-waktu campuran mortar.

Peningkatan beban lentur seiring bertambahnya waktu mencerminkan proses pembebanan yang berlangsung stabil, dengan tegangan internal terdistribusi secara progresif hingga mencapai kapasitas maksimum material. Hubungan yang cenderung linier ini menunjukkan bahwa tidak terjadi deformasi plastis yang signifikan sebelum keruntuhan. Fenomena ini berkaitan erat dengan pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai produk utama hidrasi semen yang berperan dalam meningkatkan kekuatan dan kekompakan matriks mortar. Pada campuran dengan RHA, reaksi pozzolanik menghasilkan tambahan C-S-H sekunder yang mampu mengisi pori-pori dan memperbaiki kualitas *interfacial transition zone* (ITZ), sehingga struktur menjadi lebih padat dan mampu mempertahankan peningkatan beban dalam durasi yang lebih panjang (Fernando dkk., 2022). Sebaliknya, penggunaan RCP cenderung menunjukkan reaktivitas yang lebih rendah karena sebagian besar partikelnya telah mengalami hidrasi sebelumnya, sehingga kandungan fase aktif seperti  $C_3S$  dan  $C_2S$  menjadi terbatas (Nurfaidah dkk., 2026). Selain itu, adanya lapisan produk hidrasi lama yang menyelimuti partikel RCP serta ukuran partikel yang relatif lebih kasar menyebabkan luas permukaan spesifik lebih kecil, sehingga menghambat reaksi lanjutan dan menghasilkan ITZ yang lebih heterogen serta rentan terhadap inisiasi retak (Singh dkk., 2023). Setelah mencapai beban puncak, seluruh variasi menunjukkan penurunan beban secara tiba-tiba tanpa fase pelemahan bertahap, yang mengindikasikan perilaku getas. Hal ini disebabkan oleh mekanisme keruntuhan lentur yang didominasi oleh propagasi retak cepat pada zona tarik, sehingga spesimen langsung mengalami patah tanpa adanya penurunan beban secara bertahap.



Gambar 2. (a) Kurva beban lentur-waktu, dan (b) perbandingan beban-waktu campuran mortar berbasis SCMs.

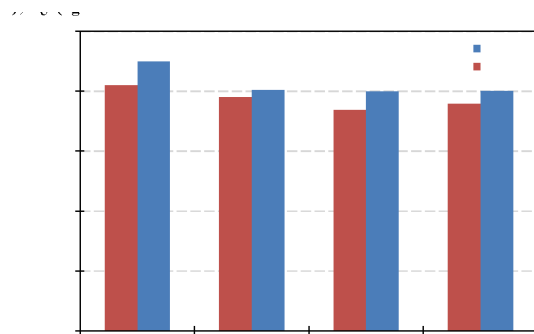
#### 3.2 Dampak Lingkungan

Gambar 3 menampilkan dampak lingkungan dari mortar berbasis SCMs. Seluruh variasi dengan penggunaan SCMs menunjukkan penurunan nilai GWP dibandingkan mortar kontrol. Penurunan tertinggi diperoleh pada variasi 15%RHA sebesar 11,17%, diikuti oleh 7,5%RCP+RHA sebesar 10,90% dan 15%RCP sebesar 10,61%. Tren serupa juga diamati pada parameter EE, yang menunjukkan bahwa seluruh variasi mengalami penurunan dibandingkan kontrol. Variasi 15%RHA kembali menunjukkan penurunan paling signifikan sebesar 10,09%, diikuti oleh 7,5%RCP+RHA sebesar 7,52% dan 15%RCP sebesar 4,94%.

Hasil mengindikasikan bahwa penurunan dampak lingkungan terutama dipengaruhi oleh berkurangnya proporsi semen sebagai kontributor dominan emisi karbon dan konsumsi energi, yang diketahui menyumbang sekitar 88–92% emisi  $CO_2$  dan 68–76% konsumsi energi dalam produksi mortar. Tingginya kontribusi tersebut terutama

berasal dari proses pembentukan klinker yang bersifat sangat intensif energi. Secara khusus, proses kalsinasi batu kapur dalam kiln menjadi sumber emisi utama melalui reaksi dekomposisi  $\text{CaCO}_3$  pada suhu sekitar  $1450^\circ\text{C}$ , dengan  $\text{CO}_2$  yang dilepaskan merupakan *process emission* yang berasal langsung dari bahan baku, bukan dari pembakaran bahan bakar. Tahapan ini berkontribusi sekitar 60–65% terhadap total emisi industri semen (Hilaloglu dkk., 2026).

Substitusi semen dengan RHA menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dalam menurunkan GWP dan EE karena material ini berasal dari limbah pembakaran sekam padi yang telah mengalami proses termal, sehingga kebutuhan energi tambahan relatif rendah (Hu dkk., 2020). Selain itu, kandungan silika amorf yang tinggi memungkinkan reaksi pozzolanik berlangsung optimal tanpa meningkatkan intensitas energi produksi. Sebaliknya, penggunaan RCP cenderung menghasilkan dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan RHA karena memerlukan tahapan pengolahan seperti penghancuran, penggilingan, dan penyaringan, yang meningkatkan konsumsi energi dan emisi secara keseluruhan.

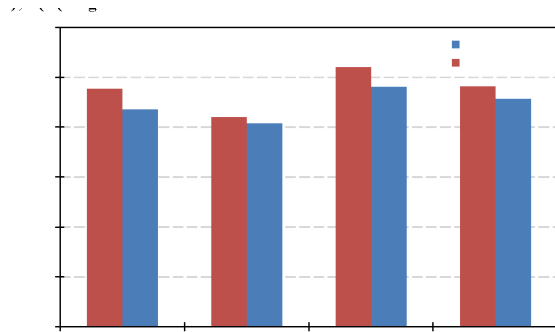


Gambar 3. Nilai GWP dan EE pada mortar berbasis SCMs.

### 3.3 Analisis Sustainability

Gambar 4 mengilustrasikan hasil analisis sustainability mortar berbasis SCMs melalui parameter Eco-GWP dan Eco-EE. Variasi 15%RHA menunjukkan nilai Eco-GWP tertinggi sebesar 4,81 sebagai kondisi paling optimum dibandingkan variasi lainnya. Hal yang sama juga ditunjukkan pada parameter Eco-EE, dengan variasi 15%RHA menghasilkan nilai tertinggi sebesar 1,04, yang mengindikasikan kinerja keberlanjutan terbaik. Kemudian diikuti dengan kombinasi RCP+RHA, sementara variasi RCP menunjukkan nilai terendah

Perilaku tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai *eco-performance*, maka campuran memiliki kinerja keberlanjutan yang lebih baik karena rasio yang digunakan merepresentasikan perbandingan performa mekanik terhadap dampak lingkungan. Nilai yang lebih tinggi mengindikasikan bahwa material mampu menghasilkan kinerja mekanik yang lebih besar untuk setiap unit dampak lingkungan yang ditimbulkan. Pada variasi 15%RHA, nilai Eco-GWP dan Eco-EE yang lebih tinggi menunjukkan bahwa peningkatan kinerja mekanik relatif lebih signifikan dibandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan, sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih baik. Hasil ini menegaskan bahwa penggunaan RHA memberikan kontribusi yang lebih optimal dalam meningkatkan sustainability mortar dibandingkan kombinasi atau penggunaan RCP secara tunggal.



Gambar 4. Nilai Eco-GWP dan Eco-EE pada mortar berbasis SCMs.

#### 4 KESIMPULAN

Penggunaan SCMs berupa RCP dan RHA terbukti mempengaruhi kinerja mekanik dan dampak lingkungan mortar secara signifikan. Substitusi 15%RHA menunjukkan keseimbangan terbaik antara performa lentur dan keberlanjutan, ditandai dengan nilai eco-performance tertinggi, sehingga paling efektif dalam menghasilkan kinerja mekanik optimal dengan dampak lingkungan yang minimal. Sebaliknya, penggunaan RCP cenderung menurunkan performa mekanik dan efisiensi lingkungan relatif. Oleh karena itu, RHA direkomendasikan sebagai material substitusi semen yang lebih berkelanjutan dalam pengembangan mortar ramah lingkungan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin atas dukungan akademik yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada Laboratorium Eco-material atas bimbingan, arahan, serta fasilitas yang telah mendukung kelancaran penelitian ini.

#### REFERENSI

- Aminul Haque, M., Chen, B., Riaz Ahmad, M., & farasat ali shah, S. (2020). Mechanical strength and flexural parameters analysis of micro-steel, polyvinyl and basalt fibre reinforced magnesium phosphate cement mortars. *Construction and Building Materials*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117447>
- Bakka', J. D., Caronge, M. A., & Tjaronge, M. W. (2024). Experimental investigation on flexural strength and environmental performance of concrete prepared with recycled polypropylene plastic as fine aggregate. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 9(2). <https://doi.org/10.1007/s41024-024-00472-w>
- Bennett, B., Visintin, P., & Xie, T. (2022). Global warming potential of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials. *Journal of Building Engineering*, 52(February), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104394>
- Dughaishi, H. Al, Leong, G. W., Mo, K. H., & Milad, A. (2026). Utilization of recycled concrete powder in sustainable cement production: A critical review. *Journal of Building Engineering*, 122, 115727. <https://doi.org/10.1016/j.job.2026.115727>
- Fernando, S., Gunasekara, C., Law, D. W., Nasvi, M. C. M., Setunge, S., Dissanayake, R., & Robert, D. (2022). Environmental evaluation and economic analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated bricks. *Environmental Impact Assessment Review*, 95(March). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106784>
- García, G., Cabrera, R., Rolón, J., Pichardo, R., & Thomas, C. (2024). Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions. *Journal of Building Engineering*, 98(19), 111267. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111267>
- Hilaloglu, F., Kanwal, Q., Almarshoud, M. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2026). CO<sub>2</sub> sequestration pathways in cementitious materials: Mechanisms, material synergies, and deployment challenges for low-carbon construction. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 29(9), 200313. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2026.200313>

- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>
- Hu, L., He, Z., & Zhang, S. (2020). Sustainable use of rice husk ash in cement-based materials: Environmental evaluation and performance improvement. *Journal of Cleaner Production*, 264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121744>
- Namakiaraghi, P., Yen, E., & Farnam, Y. (Amir). (2025). Using lattice and hollow architected polymeric reinforcement to improve flexural performance of cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 487(11), 142124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142124>
- Nurfaidah, S., Caronge, M. A., & Irmawaty, R. (2026). Assessing mortar durability with recycled concrete powder: toward circular use of construction materials. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73(1), 36. <https://doi.org/10.1186/s44147-026-00899-7>
- Real, S., Sousa, V., Meireles, I., Bogas, J. A., & Carriço, A. (2022). Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production. *Materials*, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196766>
- Sathiparan, N., Anburuvel, A., Muralitharan, M., & Isura Kothalawala, D. A. (2022). Sustainable use of coco pith in cement-sand mortar for masonry block production: mechanical characteristics, durability and environmental benefit. *J Clean Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132243>
- Singh, A., Miao, X., Zhou, X., Deng, Q., Li, J., Zou, S., & Duan, Z. (2023). Use of recycled fine aggregates and recycled powders in sustainable recycled concrete. *Journal of Building Engineering*, 77(June), 107370. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107370>