

Pemanfaatan *fly ash* tipe c dan *perlite* sebagai material substitusi semen dan pasir pada pembuatan beton ramah lingkungan

Moh. Ulil Absor^{1,*}, Aura Azzahra¹, Maulana Ardan Fahrezi¹, Atmaja Mulia Wicaksana¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Eco-friendly concrete

Fly ash

Perlite

Compressive strength

Corresponding Author:

Moh. Ulil Absor

051002300035@std.trisakti.ac.id

Abstract

The construction industry's high cement consumption significantly increases carbon dioxide (CO₂) emissions during production. This study experimentally analyzes the effects of substituting 15% Type C fly ash for cement and varying perlite proportions for fine aggregate on concrete properties, using normal concrete as the control mix across several perlite variations. Parameters evaluated include workability via slump test, unit weight, and compressive strength at 28 days of curing. Results indicate that the incorporation of 15% fly ash with varying perlite percentages enhances fresh concrete workability, with the highest slump value reaching 100.74 mm. The effect of perlite on unit weight was inconsistent across mix proportions; the lowest unit weight of 2,194.34 kg/m³ was recorded in the 15% fly ash and 2.5% perlite mix, while the 10% perlite mix yielded a higher unit weight of 2,283.02 kg/m³ than normal concrete at 2,245.28 kg/m³. In terms of compressive strength, normal concrete reached 12.93 MPa, while the 15% fly ash mix without perlite achieved the highest value of 22.52 MPa. Among combined mixtures, compressive strength varied non-linearly with increasing perlite content, ranging from 10.07 MPa (2.5%) to 15.39 MPa (7.5%), with the optimal perlite proportion identified at 7.5%, surpassing the compressive strength of normal concrete. In terms of environmental impact, the 15% fly ash substitution reduced CO₂ emissions by 51.96 kg CO₂/m³, equivalent to a 14.5% decrease compared to normal concrete, supporting decarbonization efforts in the construction sector.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Latar belakang

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor penyumbang emisi karbon dioksida (CO₂) terbesar di dunia dengan kontribusi mencapai sekitar 8–9% dari total emisi global (Putra, R., dkk., 2024). Emisi ini bersumber dari dua proses utama, yaitu reaksi dekarbonisasi CaCO₃ pada suhu kalsinasi 1.450°C dan pembakaran bahan bakar fosil sebagai sumber energi dalam

proses tersebut (Dhanasingh Sivalinga, V., dkk., 2024).

Secara paralel, krisis keberlanjutan juga terjadi pada rantai pasok agregat halus. Lebih dari 50 miliar ton pasir dan kerikil diekstraksi secara global setiap tahunnya untuk kebutuhan konstruksi (Bar-Tal, A., dkk., 2019). Permintaan yang terus meningkat, dikombinasikan dengan regulasi penambangan yang sering kali lemah, telah mengubah pasir dari sumber daya yang dianggap melimpah menjadi komoditas

yang menimbulkan konflik ekologis dan sosial.

Dalam upaya dekarbonisasi konstruksi, *fly ash* telah teruji secara ilmiah sebagai material pozzolanik pilihan untuk substitusi parsial semen. Sebagai produk sampingan pembakaran batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), pemanfaatannya dalam beton merealisasikan prinsip ekonomi sirkular dengan mengonversi limbah menjadi sumber daya yang bernilai tambah (Jiang, Y., dkk., 2024). Secara teknis, partikel *fly ash* tipe C yang halus dan berbentuk bulat (spherical) berfungsi sebagai *ball bearing* mikro, yang secara signifikan mampu meningkatkan *workability* pada campuran beton segar (Wu, M., dkk., 2022). Secara kimia, partikel ini juga bereaksi secara pozzolanik dengan kalsium hidroksida dalam jangka panjang, membentuk gel C-S-H tambahan yang menyumbang peningkatan kekuatan dan durabilitas beton.

Sejalan dengan substitusi bahan pengikat, peningkatan performa beton juga dapat dicapai melalui modifikasi agregat halus dengan menggunakan *perlite*. *Perlite* merupakan material ringan berpori yang mampu menurunkan berat jenis beton serta meningkatkan sifat isolasi termal tanpa mengurangi kinerja mekanik secara signifikan (Dimitriou, A., dkk., 2023). Selain itu, struktur mikropori yang dimiliki *perlite* berpotensi memperbaiki distribusi tegangan internal dan menekan risiko retak, sehingga dapat berkontribusi terhadap peningkatan durabilitas beton secara keseluruhan (Mehta, PK, dkk., 2014). Substitusi parsial agregat halus dengan *perlite* juga menawarkan potensi penurunan densitas beton. Meskipun demikian, karakteristik porositas tinggi dan kapasitas absorpsi air yang besar pada *perlite* menjadi tantangan teknis yang perlu diperhatikan, sebab kedua sifat tersebut berpotensi menurunkan kuat tekan dan *workability* campuran beton apabila tidak ditangani melalui proporsi campuran yang tepat.

Meskipun *fly ash* dan *perlite* masing-masing telah banyak diteliti secara terpisah sebagai material substitusi semen dan agregat halus, penelitian yang mengkaji pengaruh kombinasi keduanya secara simultan terhadap sifat beton, khususnya dalam mengidentifikasi kadar optimum *perlite* ketika dipadukan dengan *fly ash* tipe C, masih terbatas. Berdasarkan urgensi dan potensi tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi pengaruh substitusi parsial semen dengan 15% *fly ash* tipe C dan substitusi agregat halus dengan *perlite* pada variasi kadar 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% terhadap sifat-sifat beton. Parameter yang dianalisis mencakup sifat beton segar yang meliputi *workability* melalui *slump test*, berat volume, dan sifat mekanis beton berupa kuat tekan pada umur 28 hari. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menyediakan data empiris dan formulasi campuran yang optimal sebagai landasan pengembangan beton berkelanjutan, sekaligus memberikan kontribusi nyata terhadap upaya global dalam mewujudkan praktik konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

Batasan Penelitian

Perhitungan potensi reduksi emisi CO₂ dalam penelitian ini hanya didasarkan pada kalkulasi substitusi parsial semen dengan *fly ash* tipe C sebesar 15%, mengacu pada faktor emisi produksi semen Portland dan faktor emisi *fly ash*, tanpa memperhitungkan emisi dari proses transportasi material, maupun konsumsi penggunaan alat, energi selama pencampuran dan pengecoran, sehingga nilai reduksi yang disajikan bersifat estimasi awal dan bukan merupakan estimasi jejak karbon (*carbon footprint*) beton secara menyeluruh.

Landasan Teori

Semen

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis utama dalam beton yang berfungsi merekatkan agregat melalui proses hidrasi ketika bereaksi dengan air (Torres-Ortega, Torres-Sanchez, & Lopez-Lara, 2024). Semen Portland sebagai jenis yang paling

umum digunakan tersusun atas senyawa utama C_3S , C_2S , C_3A , dan C_4AF , di mana C_3S berperan dalam perkembangan kuat tekan awal, sedangkan C_2S berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan jangka panjang. Proses hidrasi semen menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai komponen utama pembentuk kekuatan beton serta kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) sebagai produk samping hidrasi (ASTM International, 2020). Keberadaan $Ca(OH)_2$ dalam sistem beton memungkinkan terjadinya reaksi pozzolanik dengan material tambahan seperti *fly ash* yang menghasilkan C-S-H berkontribusi terhadap mikrostruktur beton.

Pasir

Pasir merupakan komponen utama agregat halus yang berfungsi sebagai pengisi (filler) dalam matriks beton, dengan fraksi ukuran partikel umumnya antara 0,075 mm (saringan No. 200) hingga 4,75 mm (saringan No. 4) (ASTM International, 2020). Pasir berperan penting dalam mengisi rongga antar agregat kasar, mengurangi volume pori total, sekaligus meningkatkan kekompakan dan *workability* campuran beton segar. Kualitas pasir sangat menentukan sifat mekanis dan durabilitas beton keras, dimana parameter seperti gradasi, bentuk butir, tekstur permukaan, dan kekerasan menjadi faktor kunci dalam perancangan campuran beton. Gradasi yang kontinu (*well-graded*) menghasilkan beton yang padat dan kuat, sementara butiran yang bersudut dan bertekstur kasar meningkatkan ikatan mekanis dengan pasta semen meskipun dapat mengurangi *workability* (Ragul, K., dkk., 2022).

Fly ash

Fly ash merupakan material hasil samping pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap yang memiliki sifat pozzolan dan banyak dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial semen dalam campuran beton. *Fly ash* tipe C memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi serta kadar kalsium yang rendah, sehingga

bereaksi secara pozzolanik dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan (Baidya, R., Kumar Ghosh, S., & Parlikar, P., 2021). Partikel *fly ash* yang berukuran halus dan berbentuk hampir bulat (spherical) berkontribusi terhadap peningkatan *workability* beton segar melalui efek pelumasan antar partikel. Reaksi pozzolanik yang berlangsung secara bertahap menghasilkan mikrostruktur beton yang lebih rapat, menurunkan porositas, serta meningkatkan kuat tekan jangka panjang.

Perlite

Perlite merupakan mineral alami yang berasal dari batuan vulkanik. Sebelum digunakan sebagai material substitusi dalam beton, *perlite* dipanaskan pada suhu tinggi sehingga mengalami pengembangan (*expansion*) dan membentuk struktur berpori dengan berat jenis rendah. *Perlite* yang digunakan sebagai material substitusi agregat halus dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Perlite*

Substitusi sebagian agregat halus dengan *perlite* berpotensi menurunkan berat volume beton karena karakteristiknya yang memiliki berat jenis rendah. Selain menghasilkan beton yang lebih ringan, struktur mikropori pada *perlite* juga berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan insulasi termal serta memengaruhi karakteristik mekanis beton (Davraz dkk., 2020). Pengaruh tersebut terlihat pada perubahan sifat beton segar dan beton keras, seperti nilai *workability*, kuat

tekan, dan daya serap air. Namun, porositas dan kapasitas absorpsi air *perlite* yang relatif tinggi dapat meningkatkan kebutuhan air dalam campuran, sehingga proporsi substitusi dan kadar air pencampur perlu dikendalikan secara tepat.

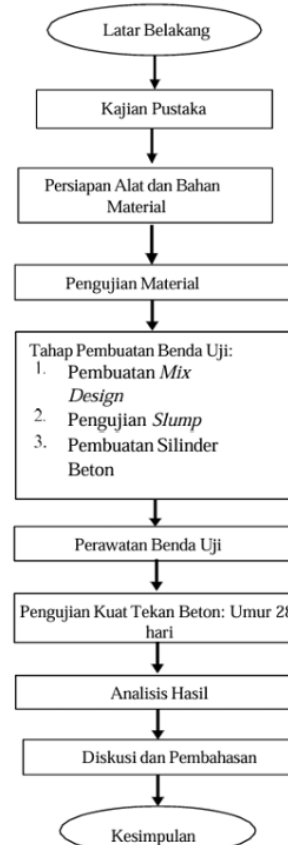
Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental di Laboratorium Beton, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Trisakti. Penelitian ini menerapkan dua variabel bebas, yaitu substitusi semen dengan *fly ash* tipe C sebesar 15% dan substitusi sebagian agregat halus (pasir) dengan *perlite* pada variasi 0%, 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%. Variabel terikat yang diamati adalah kinerja beton, yang meliputi sifat beton segar berupa nilai *slump*, serta sifat beton keras berupa berat volume dan kuat tekan karakteristik pada umur 28 hari.

Penelitian ini diawali dengan melakukan kajian pustaka, dilanjutkan dengan pengujian material penyusun beton yang meliputi semen, *fly ash*, pasir, *perlite*, dan agregat kasar (*split*). Berdasarkan data hasil pengujian yang diperoleh, dilakukan perancangan campuran beton (*mix design*) menggunakan metode SNI 7656:2012 dengan target kuat tekan f'_c sebesar 27,5 MPa dan nilai *slump* 100 mm. Selanjutnya, dibuat lima variasi campuran dengan substitusi *fly ash* sebesar 15% terhadap semen dan substitusi *perlite* terhadap sebagian agregat halus. Setiap variasi kemudian dicampur sesuai komposisinya, dilanjutkan dengan pengujian *slump* pada beton segar dan pengecoran benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Setelah pengecoran, benda uji dirawat dengan metode perendaman dalam air. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari menggunakan *Compression Testing Machine*, dengan benda uji dikeluarkan dari perendaman minimal 24 jam sebelum pengujian.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara komparatif untuk mengevaluasi

pengaruh substitusi *fly ash* dan *perlite* terhadap kinerja beton. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai *slump*, berat volume, dan kuat tekan karakteristik dari masing-masing variasi campuran terhadap beton kontrol. Selain itu, dilakukan analisis persentase perubahan untuk mengidentifikasi kecenderungan peningkatan atau penurunan kinerja beton akibat variasi kadar *perlite*. Hubungan antara kandungan *perlite* dan sifat mekanis beton dianalisis guna menentukan komposisi optimum yang masih memenuhi persyaratan beton struktural. Tahapan penelitian secara lengkap disajikan pada diagram *flowchart* Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Hasil Penelitian

Hasil pengujian material penyusun beton

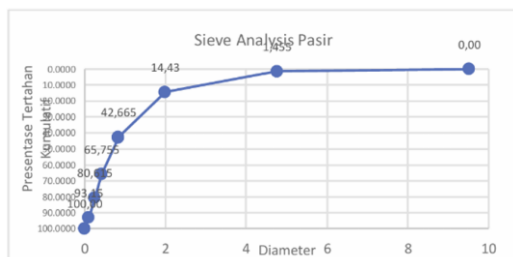
Hasil Pengujian material yang telah dilakukan di laboratorium disajikan pada tabel berikut.

Sieve analysis pasir

Tabel 1. Pengujian (Pasir)

Diameter Ayakan (mm)	Analisa Distribusi Ukuran Butir Pasir				
	Perc 1 (mm)	Perc 2 (mm)	Rata- rata (mm)	% Tertahan	% Jumlah Sisa
9,52	0	0	0	0	0
4,75	17,3	11,8	14,55	1,455	1,455
2	129,3	130,2	129,75	12,975	14,43
0,84	283,3	281,4	282,35	28,235	42,665
0,42	230,8	231	230,9	23,09	65,755
0,25	147,6	149,6	148,6	14,86	80,615
0,105	123,2	127,5	125,35	12,535	93,15
0	68,5	68,5	68,5	6,85	-
Total	1000	1000	1000	100	298,07

Berdasarkan Tabel 1, diperoleh jumlah persentase kumulatif sebesar 298,07%. Nilai Modulus Kehalusan (*Finesness Modulus/FM*) dihitung dengan membagi jumlah persentase kumulatif tersebut dengan 100, sehingga diperoleh nilai FM sebesar 2,98. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan tergolong dalam kategori pasir sedang. Selanjutnya, distribusi ukuran butir agregat halus dapat dilihat lebih jelas melalui kuva gradasi pasir yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva Gradasi Pasir

Hasil analisis saringan terhadap agregat halus menunjukkan persentase kumulatif tertahan yang disajikan pada Gambar 3. Kurva gradasi memperlihatkan distribusi butiran yang *relative* baik dengan dominasi fraksi berukuran menengah hingga halus pada ayakan 0,42–0,84 mm, serta penurunan fraksi pada ukuran lebih halus (<0,25 mm). Distribusi ini menunjukkan bahwa pasir yang digunakan memenuhi karakteristik agregat halus untuk campuran beton yang memerlukan kekuatan dan *workability* yang baik. Kurva gradasi pasir cenderung memasuki gradasi zona 4 kategori pasir halus dengan referensi SNI 03-2834-2000.

Kadar kotor, berat isi, berat jenis, penyerapan dan kadar air pada pasir

Untuk mengevaluasi kualitas agregat halus sebagai material penyusun beton, dilakukan pengujian kadar kotor, berat isi, berat jenis, penyerapan air dan kadar air pada pasir. Kelima parameter tersebut digunakan untuk menilai kebersihan, kepadatan, serta kemampuan agregat dalam menyerap air yang berpengaruh terhadap perancangan campuran beton. Hasil pengujian tersebut masing masing disajikan pada Tabel 2,3 dan 4.

Tabel 2. Pengujian Kadar Kotoran Pasir

No	Pengujian	Persentase Kadar Kotor
1	Kadar Kotor (<i>by volume</i>)	6,89%
2	Kadar Kotor (<i>by weight</i>)	3,31%

Berdasarkan pengujian di Tabel 2 menurut persyaratan PBI Pasal 3.3.3: “Bila kadar lumpur melampaui 5% dari berat kering, maka agregat atau pasir harus dicuci dulu”. Dari Pengujian di atas *by weight* didapat kadar kotoran 3,31%, maka pasir tidak perlu dicuci.

Tabel 3. Pengujian Berat Isi, Berat dan Penyerapan

No	Pengujian	Hasil Uji
1	Berat Isi	1601,18 gr/l
2	<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,334
3	<i>Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry Basis)</i>	2,382
4	<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,451
5	<i>Absorption</i> (Penyerapan)	2,041 %

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 3, diperoleh nilai *Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry Basis)* sebesar 2,382. Jika dibandingkan dengan ketentuan dalam SNI 03-1969-1990, berat jenis agregat halus seharusnya berada pada kisaran 2,5 hingga 2,7. Nilai yang lebih

rendah dari standar tersebut menunjukkan bahwa agregat memiliki porositas yang cukup tinggi atau terdapat kandungan kotoran yang mempengaruhi kualitasnya.

Tabel 4. Pengujian Kadar Air Pasir

No	Pengujian	Hasil Uji
1	Berat pasir	1000 gr
2	Berat pasir kering	936,6 gr
3	Kadar air pasir	3,778%

Pasir yang diuji mengandung air sebesar 3,778% dari berat keringnya. Tabel 4 menunjukkan bahwa pasir tersebut dalam kondisi agak basah, dan jika akan digunakan dalam campuran beton, perlu dilakukan koreksi terhadap perhitungan jumlah air agar tidak mempengaruhi workabilitas dan kekuatan beton.

Sieve analysis split

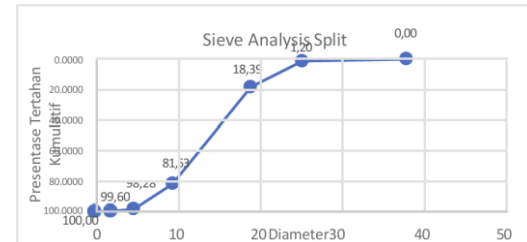
Untuk mengevaluasi karakteristik gradasi agregat kasar sebagai material penyusun beton, dilakukan pengujian analisis saringan (*sieve analysis*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat serta memastikan kesesuaiannya dengan gradasi yang dipersyaratkan, Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Agregat Kasar (Split)

Diameter Ayakan (mm)	Analisa Distribusi Ukuran Butir Pasir				
	Perc 1 (mm)	Perc 2 (mm)	Rata-rata (mm)	Tertahan (%)	%
38,1	0	0	0	0	0
25,4	24	0	12	1,2	1,2
19,1	197,3	146,5	171,9	17,19	18,39
9,52	589,6	675,2	632,4	63,24	81,63
4,76	180	153	166,5	16,65	98,28
2,0	7,5	18,9	13,2	1,32	99,60
0	1,6	6,4	4	0,4	-
Total	1000	1000	1000	100	299,1

Berdasarkan hasil analisis saringan pada Tabel 5, distribusi ukuran butir agregat kasar telah memenuhi persyaratan gradasi sesuai SNI 03-2834-2000 dengan ukuran nominal maksimum sebesar 19 mm. Karakteristik gradasi tersebut menunjukkan bahwa agregat layak digunakan sebagai material penyusun beton untuk berbagai aplikasi konstruksi. Untuk memperjelas distribusi ukuran butir agregat kasar, berikut disajikan

kurva gradasi yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva Gradasi Split

Berat isi, berat jenis, penyerapan dan kadar air split

Karakteristik agregat kasar dievaluasi melalui pengujian berat isi, berat jenis, penyerapan air dan kadar air. Hasil pengujian tersebut disajikan pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel 6. Pengujian Berat Isi, Berat Jenis dan Penyerapan Split

No	Pengujian	Hasil Uji
1	Berat Isi	1390,065 gr/L
2	Bulk Specific Gravity (Berat Jenis Butir)	2,740
3	Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry Basis)	2,859
4	Apparent Specific Gravity	3,110
5	Absorption (Penyerapan)	4,341 %

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 6, nilai *Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry Basis)* diperoleh sebesar 2,859. Menurut SNI 03-1969-1990, agregat halus dinyatakan baik apabila memiliki berat jenis berada pada kisaran 2,5 hingga 2,7. Nilai hasil uji ini berada di atas batas atas standar yang ditetapkan, namun masih dapat dikategorikan baik karena menunjukkan bahwa agregat memiliki kepadatan yang cukup tinggi dan kualitasnya tergolong memenuhi syarat teknis. Dengan demikian, hasil pengujian pada tabel 6 dapat dikatakan memenuhi persyaratan SNI yang berlaku.

Tabel 7. Pengujian Kadar Air Split

No	Pengujian	Hasil Uji
1	Berat split	1000 gr
2	Berat split kering	974,6 gr
3	Kadar air split	2,606%

Hasil pengujian pada Tabel 7 menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki kadar air sebesar 2,606%. Nilai kadar air tersebut perlu diperhitungkan dalam perancangan campuran beton karena memengaruhi jumlah air yang ditambahkan selama proses pencampuran.

Hasil pengujian berat isi semen, fly ash, dan perlite

Pengujian berat isi dilakukan terhadap semen, fly ash, dan perlite untuk mengetahui karakteristik kepadatan masing-masing material sebagai dasar perancangan dalam campuran beton. Hasil pengujian berat isi disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Pengujian Berat Isi

No	Pengujian	Hasil Uji (gr/l)
1	Berat Isi Semen	1090,665
2	Berat Isi Fly Ash	1102,57
3	Berat Isi Perlite	56,45

Hasil pengujian pada Tabel 8 didapatkan berat isi semen sebesar 1090,665 gr/l, berat isi Fly ash 1102,57 gr/l dan berat isi Perlite sebesar 56,45 gr/l. Fly ash memiliki partikel yang lebih padat dan kurang berongga dibandingkan perlite, sehingga berat isinya lebih tinggi.

Perlite memiliki berat isi yang jauh lebih rendah (56,45 gr/l) dibandingkan pasir (1601,18 gr/l). Oleh karena itu, substitusi parsial agregat halus dengan perlite secara linear mengurangi densitas akhir beton.

Perancangan campuran beton

Perancangan campuran beton (mix design) dilakukan mengacu pada SNI 7656:2012 sebagai dasar penentuan proporsi material penyusun beton. Perancangan ini meliputi campuran beton normal dengan mutu rencana $f'c$ 27,5 MPa serta campuran beton variasi yang menggunakan substitusi perlite

pada agregat halus. Hasil perancangan campuran disajikan pada Tabel 9 hingga Tabel 13.

Beton normal

Tabel 9. Komposisi Beton Normal

	Semen	Pasir	Split	Air
Berat (kg/m ³)	431,55	867,46	835,07	198,98
Rasio	1	2,01	1,94	0,46

Beton variasi 1

Rancangan campuran Beton Variasi 1, yang menggunakan substitusi 15% fly ash dari jumlah komposisi semen, disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Komposisi Beton Variasi 1

	Semen	Pasir	Split	Air	FA
Berat (kg/m ³)	366,82	867,46	835,07	198,98	65,45
Rasio	1	2,36	2,28	0,54	0,18

Beton variasi 2

Rancangan campuran Beton Variasi 2, yang menggunakan substitusi 15% fly ash dari jumlah komposisi semen dan 2,5% perlite dari jumlah komposisi agregat halus (pasir), disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11. Komposisi Beton Variasi 2

	Semen	Pasir	Split	Air	FA	Perlite
Berat (kg/m ³)	366,82	845,78	835,07	198,98	65,45	0,77
Rasio	1	2,31	2,28	0,54	0,18	0,002

Beton variasi 3

Rancangan campuran Beton Variasi 3, yang menggunakan substitusi 15% fly ash dari jumlah komposisi semen dan 5% perlite dari jumlah komposisi agregat halus (pasir), disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Komposisi Beton Variasi 3

	Semen	Pasir	Split	Air	FA	Perlit
Berat kg/m ³	366,8	824,0	835,0	198,9	65,4	1,53
Rasio	1	2,25	2,28	0,54	0,18	0,004

Beton variasi 4

Rancangan campuran Beton Variasi 4, yang menggunakan substitusi 15% fly ash dari

jumlah komposisi semen dan 7,5% *perlite* dari jumlah komposisi agregat halus (pasir), disajikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Komposisi Beton Variasi 4

	Semen	Pasir	Split	Air	FA	Perlite
Berat (kg/m ³)	368,82	802,23	835,07	198,98	65,45	2,296
Rasio	1	2,19	2,28	0,54	0,18	0,006

Beton variasi 5

Rancangan campuran Beton Variasi 5, yang menggunakan substitusi 15% *fly ash* dari jumlah komposisi semen dan 10% *perlite* dari jumlah komposisi agregat halus (pasir), disajikan pada Tabel 14.

Tabel 14. Komposisi Campuran Beton

	Semen	Pasir	Split	Air	FA	Perlit
Berat (kg/m ³)	366,82	780,71	835,07	198,98	65,45	3,06
Rasio	1	2,13	2,28	0,54	0,18	0,006

Hasil pengujian slump

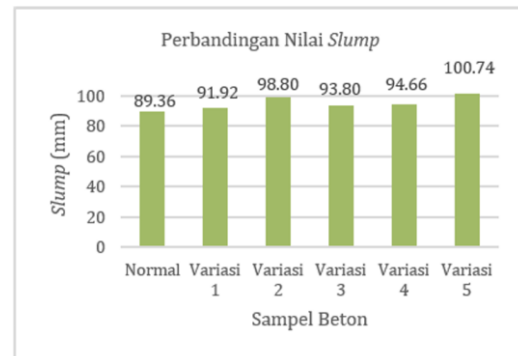
Pengujian *slump* dilakukan untuk mengevaluasi tingkat *workability* campuran beton sebagai indikator kemudahan proses pencampuran, pengangkutan, pengecoran, dan pemadatan. Nilai *slump* yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi *perlite* sebagai agregat halus terhadap konsistensi campuran beton. Hasil pengujian *slump* disajikan pada Tabel 15.

Tabel 15. Hasil Pengujian *Slump*

No	Jenis Beton	Slump (mm)
1	Normal	89,36
2	Variasi 1	91,92
3	Variasi 2	98,80
4	Variasi 3	93,80
5	Variasi 4	94,66
6	Variasi 5	100,74

Hasil menunjukkan bahwa substitusi 15% *Fly ash* (FA) 10% kadar *perlite* pada variasi 5 meningkatkan nilai *slump* menjadi 100,74 mm. Peningkatan ini disebabkan oleh efek sinergis kedua material. Partikel spherical FA berperan sebagai pelumas yang mengurangi gesekan internal, sedangkan

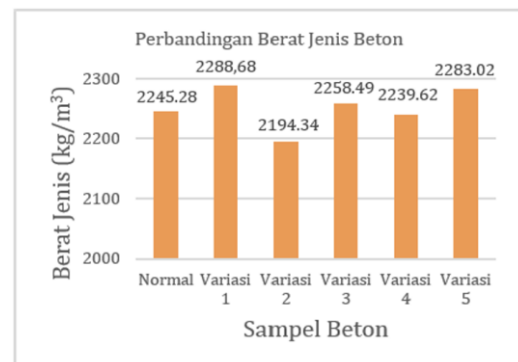
partikel berongga *perlite* meningkatkan volume pasta pengikat, sehingga meningkatkan fluiditas terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Perbandingan Nilai *Slump* Test

Hasil pengujian berat jenis beton

Pengujian berat jenis beton dilakukan untuk mengetahui pengaruh substitusi *perlite* terhadap densitas beton pada masing-masing variasi campuran. Hasil pengujian berat jenis beton untuk sampel Normal, Variasi 1, Variasi 2, Variasi 3, Variasi 4, dan Variasi 5 disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Perbandingan Berat Jenis Beton

Berdasarkan data Gambar 6, berat beton dari lima variasi campuran, terlihat bahwa berat beton bervariasi antar setiap formula, menunjukkan bahwa setiap substitusi atau perubahan komposisi memengaruhi densitas akhir material. Variasi 1 dan Variasi 5 menunjukkan berat tertinggi (masing-masing 2288,68 kg/m³ dan 2283,02 kg/m³ sementara Variasi 2 memiliki berat terendah 2194,34 kg/m³. Variasi 3 dan 4 berada di

antara keduanya, dengan nilai yang relatif lebih dekat ke Variasi 2. Perbedaan ini mencerminkan pengaruh material substitusi terhadap kepadatan dan struktur internal beton.

Data dalam grafik diatas juga menunjukkan berat beton untuk lima variasi campuran dimana terdapat pola yang menarik untuk dianalisis. Meskipun Variasi 5 mengandung 10% *perlite* berat yang dihasilkan (2283,02 kg/m³) ternyata tidak jauh berbeda dengan Variasi 1 (2288,68 kg/m³) dan bahkan lebih tinggi dibandingkan Variasi 2 (2194,34 kg/m³). Fenomena ini mengindikasikan bahwa efek ringan dari *perlite* mungkin terkompensasi atau tertutupi oleh faktor faktor lain dalam komposisi campuran.

Hasil pengujian kuat tekan beton

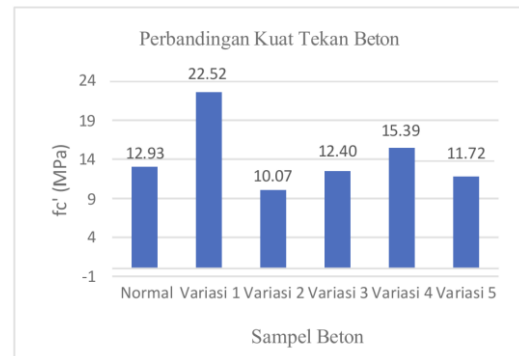
Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari untuk mengevaluasi pengaruh substitusi *fly ash* tipe C dan *perlite* terhadap sifat mekanis beton. Pengujian dilakukan pada 18 benda uji yang terdiri atas beton normal sebagai kontrol dan beton variasi. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 16.

Tabel 16. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

No	Jenis Beton	f _c (MPa)
1	Beton Normal	12,93
2	Variasi 1	22,52
3	Variasi 2	10,07
4	Variasi 3	12,40
6	Variasi 4	15,39
7	Variasi 5	11,72

Umur 28 hari pada Tabel 16, dapat disimpulkan bahwa variasi komposisi campuran berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan. Beton normal sebagai kontrol memiliki kuat tekan 12,93 MPa. Di antara seluruh variasi, Variasi 1 menunjukkan kinerja terbaik dengan kuat tekan mencapai 22,52 MPa, yang meningkat secara signifikan dibandingkan beton normal. Di sisi lain, Variasi 2 menghasilkan kuat tekan terendah sebesar 10,07 MPa, di bawah nilai kontrol, mengindikasikan komposisi yang

kurang efektif. Variasi 3 dan Variasi 5 masing-masing mencapai 12,40 MPa dan 11,72 MPa. Sementara itu, Variasi 4 menunjukkan perbaikan moderat dengan kuat tekan 15,39 MPa. Dari pola hasil pengujian, terlihat bahwa substitusi *perlite* 7,5% pada Variasi 4 merupakan kadar optimum, ditunjukkan oleh peningkatan kuat tekan sebesar 19% terhadap acuan. Sementara itu, penambahan *perlite* hingga 10% pada Variasi 5 justru menyebabkan penurunan kuat tekan, mengisyaratkan bahwa kadar *perlite* yang berlebih dapat mengurangi kepadatan dan integritas matriks beton. Berikut gambar grafik nilai kuat tekan beton.



Gambar 7. Diagram Perbandingan Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian pada Gambar 7 menunjukkan bahwa peningkatan kadar substitusi *perlite* tidak memberikan pengaruh yang linear terhadap kuat tekan beton. Penambahan *perlite* hingga kadar 7,5% (Variasi 4) masih mampu meningkatkan kuat tekan hingga 19% dibandingkan beton normal, yang mengindikasikan bahwa pada rentang tersebut *perlite* berkontribusi positif terhadap pengisian pori dan kepadatan matriks beton.

Namun, pada kadar substitusi 10% (Variasi 5), kuat tekan justru mengalami penurunan menjadi 11,72 MPa, yang menunjukkan bahwa kadar *perlite* yang berlebih dapat mengurangi kepadatan dan integritas matriks beton akibat sifat *perlite* yang ringan dan berpori. Kondisi ini menegaskan adanya titik optimum substitusi *perlite*

dalam campuran, yaitu pada kisaran 7,5%, sebelum kuat tekan beton mulai menurun akibat kelebihan agregat berpori. Pola ini serupa dengan temuan sebelumnya (Alwiah dkk., 2025) di mana kuat tekan optimal dicapai pada substitusi *perlite* 5% (27,74 MPa), sementara kadar 10% dan 15% justru menurunkan kekuatan beton. Temuan ini mengkonfirmasi sifat non-linear *perlite* dalam memengaruhi kekuatan beton, di mana proporsi berlebih justru berdampak negatif terhadap kepadatan dan integritas matriks beton.

Potensi pengurangan CO₂

Perhitungan potensi reduksi emisi CO₂ dilakukan dengan mengacu pada faktor emisi produksi semen Portland sebesar 0,83 kg CO₂/kg (IPCC, 2023) dan faktor emisi *fly ash* sebesar 0,027 kg CO₂/kg yang mencakup proses transportasi dan aktivasi material. Perhitungan menggunakan volume acuan 1 m³ beton, dengan membandingkan kadar semen pada Beton Normal sebesar 431,55 kg/m³ terhadap kadar semen pada Beton Variasi 1 sebesar 366,82 kg/m³ akibat substitusi 15% *fly ash* tipe C sebesar 65,45 kg/m³.

Pada Beton Normal, emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen adalah: 431,55 kg × 0,83 kg CO₂/kg = 358,19 kg CO₂/m³

Sementara itu, emisi CO₂ pada Beton Variasi 1 terdiri atas kontribusi emisi semen dan emisi *fly ash*, yaitu:

- Emisi semen: 366,82 kg × 0,83 kg CO₂/kg = 304,46 kg CO₂
- Emisi *fly ash*: 65,45 kg × 0,027 kg CO₂/kg = 1,77 kg CO₂

Total emisi: 306,23 kg CO₂/m³

Tabel 17. Hasil Emisi CO₂ Beton Normal dan Beton Variasi

Jenis Beton	Semen (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)	Emisi Semen (kgCO ₂ /kg)	Emisi Fly Ash (kg CO ₂ /kg)	Total Emisi (kg CO ₂ /m ³)
Normal	431,55	0	358,19	0,00	358,19
Variasi I	366,82	65,45	304,46	1,77	306,23

Berdasarkan Tabel 17, substitusi 15% *fly ash* tipe C terhadap semen menghasilkan penurunan emisi CO₂ sebesar 51,96 kg CO₂ per m³ beton, atau setara dengan reduksi 14,5% dibandingkan Beton Normal. Penurunan ini terjadi karena berkurangnya jumlah semen Portland yang harus diproduksi melalui proses kalsinasi bersuhu tinggi, sementara *fly ash* yang digunakan merupakan produk samping pembakaran batu bara pada PLTU yang memiliki faktor emisi jauh lebih rendah. Pemanfaatan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen dengan demikian tidak hanya memberikan manfaat peningkatan *workability*, teknis tetapi berupa juga merealisasikan prinsip ekonomi sirkular dengan mengonversi limbah industri menjadi material bernilai tambah, sekaligus berkontribusi terhadap upaya dekarbonisasi pada sektor konstruksi.

Perlu ditekankan bahwa nilai reduksi emisi CO₂ yang disajikan bersifat estimasi awal, karena perhitungan hanya memperhitungkan faktor emisi produksi semen dan *fly ash*, tanpa mencakup emisi dari proses transportasi material, penggunaan alat berat, maupun konsumsi energi selama pencampuran dan pengecoran. Dengan demikian, nilai ini belum merepresentasikan estimasi jejak karbon (*carbon footprint*) beton secara menyeluruh.

Semen Portland (OPC) merupakan penyumbang emisi karbon terbesar dalam produksi beton karena proses kalkinasi batu kapur yang melepaskan CO₂ secara langsung, di samping emisi dari pembakaran bahan bakar pada tungku (kiln) dan penggunaan listrik. Berdasarkan faktor emisi dari berbagai sumber referensi seperti ICE V3.0, EPA, EU, dan Korea LCI DB), nilai faktor emisi semen OPC berkisar antara 0,77–0,96 kgCO₂/kg semen. Studi Duong dkk. (2025) yang menghitung faktor emisi spesifik untuk semen produksi Vietnam dengan menerapkan metode Tier 2 IPCC berdasarkan fraksi klinker dan kandungan CaO memperoleh nilai yang berkisar antara 0,73 hingga 0,85 kgCO₂/kg semen untuk berbagai jenis semen (But Son, Song Gianh,

Nghi Son, Cam Pha, dan lainnya). Nilai 0,83 kgCO₂/kg yang digunakan dalam kalkulasi berada dalam rentang tersebut, sehingga secara ilmiah dapat dipertanggungjawabkan sebagai representasi wajar dari emisi produksi semen Portland.

Fly ash memiliki faktor emisi karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan semen Portland, karena emisinya hanya berasal dari proses transportasi dan aktivasi, bukan dari reaksi kimia kalsinasi. Berdasarkan studi Duong dkk. (2025), faktor emisi *fly ash* Class F menurut Korea LCI DB tercatat sebesar 0,0196 kgCO₂/kg, sementara sumber lain seperti EPA dan ICE V3.0 memberikan nilai pada rentang 0,004–0,093 kgCO₂/kg (Tabel 2), tergantung pada asumsi transportasi dan pengolahan yang digunakan. Hasil eksperimen pada berbagai model beton di Vietnam (F-OM1, F-OM2, F-OM3, F-H1, F H2) menunjukkan bahwa substitusi semen dengan *fly ash* sebesar 20–40% secara konsisten menurunkan emisi karbon sebesar 9,14% hingga 40,6%, tergantung kelas kekuatan beton, tanpa mengorbankan kinerja mekanis secara signifikan selama proporsi substitusi berada pada rentang optimal. Temuan ini memperkuat validitas hasil reduksi 14,5% yang dihitung untuk skenario substitusi 15% *fly ash*, sekaligus menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah PLTU ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dalam industri konstruksi rendah karbon.

Alasan penyebab tidak tercapainya mutu rencana

Hasil pengujian kuat tekan pada Tabel 16 menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran, termasuk Variasi 1 sebagai campuran terbaik (22,52 MPa), belum mencapai target mutu rencana sebesar 27,5 MPa. Salah satu faktor utama yang diduga menjadi penyebab adalah kualitas agregat halus yang digunakan. Nilai *Bulk Specific Gravity (Saturated Surface Dry Basis)* pasir hanya sebesar 2,382 (Tabel 3), berada di bawah rentang persyaratan SNI 03-1969-1990 (2,5–2,7), yang mengindikasikan

porositas pasir relatif tinggi sehingga menurunkan kepadatan matriks beton. Gradasi yang kurang ideal ini meningkatkan kebutuhan pasta semen dan menurunkan kepadatan pengisian rongga antaragregat, sehingga berdampak pada penurunan kuat tekan beton.

Selain faktor material, tidak tercapainya mutu rencana juga diduga dipengaruhi oleh faktor pelaksanaan di lapangan, khususnya proses pencampuran (pengadukan) yang masih dilakukan secara manual. Pengadukan manual berpotensi menghasilkan distribusi material yang kurang homogen dibandingkan penggunaan *mixer* mekanis, sehingga pasta semen, agregat, *fly ash*, dan *perlite* tidak tercampur secara merata di seluruh volume adukan. Ketidakhomogenan ini dapat menimbulkan variasi lokal dalam rasio air semen serta distribusi rongga udara yang tidak merata, yang pada akhirnya menurunkan kepadatan dan keseragaman kekuatan beton pada benda uji.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari, diperoleh bahwa nilai kuat tekan beton rata-rata tertinggi dicapai oleh Beton Variasi 1 (15% *fly ash* tanpa *perlite*) sebesar 22,52 MPa. Namun, pola yang menarik muncul pada beton yang mengandung *perlite*. Beton Variasi 4 (15% *fly ash* + 7.5% *perlite*) menunjukkan kinerja kuat tekan rata-rata tertinggi di antara semua campuran yang mengandung *perlite*, yaitu 15,39 MPa, yang bahkan lebih tinggi daripada kuat tekan beton normal sebesar 12,93 MPa. Ini mengindikasikan bahwa terdapat titik optimum substitusi *perlite* sekitar 7.5%, yang ketika dikombinasikan dengan 15% *fly ash*, mampu menghasilkan sinergi yang meningkatkan kekuatan tekan dibandingkan beton konvensional. Sementara itu, kuat tekan rata-rata campuran lain dengan *perlite* lebih rendah: Variasi 2 (2.5% *perlite*) sebesar 10,07 MPa, Variasi 3 (5% *perlite*) sebesar 12,40 MPa, dan Variasi 5 (10% *perlite*) sebesar 11,72 MPa.

Meskipun demikian, seluruh variasi campuran, termasuk Variasi 1 sebagai campuran dengan kinerja terbaik, belum mampu mencapai target mutu rencana sebesar 27,5 MPa. Ketidaktercapaian ini diduga dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor. Dari sisi material, kualitas agregat halus yang digunakan tergolong kurang optimal. Sementara itu, dari sisi pelaksanaan, proses pencampuran (pengadukan) yang masih dilakukan secara manual berpotensi menghasilkan distribusi material yang kurang homogen serta variasi lokal dalam rasio air semen, sehingga turut berkontribusi terhadap deviasi kuat tekan yang dihasilkan terhadap target mutu rencana.

Semua variasi campuran beton, baik normal maupun yang mengandung *fly ash* dan *perlite*, menghasilkan nilai *slump* yang memenuhi rentang target 75-100 mm, dengan hasil berkisar antara 89,36 mm hingga 100,74 mm. Substitusi 15% *fly ash* cenderung meningkatkan *workability*, sedangkan penambahan *perlite* tidak memberikan pengaruh negatif yang signifikan terhadap kemudahan pengerjaan adukan beton segar.

Penggunaan *perlite* sebagai material substitusi parsial terbukti efektif dalam mereduksi densitas beton, dengan Beton Variasi 2 (15% *fly ash* + 2,5% *perlite*) mencapai berat jenis terendah sebesar 2194,34 kg/m³. Namun, analisis lebih lanjut mengungkap hubungan yang tidak linier antara reduksi berat jenis dan kinerja mekanis. Beton Variasi 4 (15% *fly ash* + 7,5% *perlite*) justru menunjukkan performa optimal dengan mencapai kuat tekan 15,39 MPa. Meskipun memiliki densitas yang lebih rendah. Temuan ini mengindikasikan bahwa efektivitas *perlite* sebagai material peringan tidak selalu berbanding terbalik dengan kekuatan tekan, melainkan sangat bergantung pada proporsi sinergis dengan *fly ash* dalam sistem matriks beton, di mana terdapat rentang komposisi tertentu yang mampu memitigasi kelemahan intrinsik

agregat berpori sekaligus mempertahankan integritas struktural.

Dari aspek keberlanjutan, substitusi 15% semen dengan *fly ash* tipe C pada seluruh variasi campuran berpotensi menurunkan emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi semen penggunaan beton normal dengan kadar semen 431,55 kg/m³ menghasilkan emisi karbon sebesar 358,19 kg CO₂ per m³ beton. Ketika 15% dari kadar semen tersebut disubstitusi dengan *fly ash* (setara 65,45 kg/m³), total emisi turun menjadi 306,23 kg CO₂ per m³—terdiri dari 304,46 kg CO₂ dari sisa semen (366,82 kg) dan hanya 1,77 kg CO₂ tambahan dari proses transportasi dan aktivasi *fly ash*.

Selisih ini menghasilkan reduksi emisi sebesar 51,96 kg CO₂ per m³ beton, atau setara dengan penurunan 14,5% dibandingkan beton normal. Penurunan emisi ini terjadi karena *fly ash* memiliki faktor emisi karbon yang jauh lebih rendah (0,027 kgCO₂/kg) dibandingkan semen Portland (0,83 kgCO₂/kg), sehingga setiap kilogram semen yang digantikan oleh *fly ash* secara signifikan mengurangi jejak karbon material beton.

Daftar Pustaka

- ASTM International. ASTM C618 – *Standard Specification for Coal Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, PA; 2020.
- ASTM International. ASTM C33/C33M – *Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken, PA; 2018.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.
- 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. Peraturan Beton Indonesia (PBI). (1971). Peraturan beton bertulang Indonesia (Pasal 3.3.3). Departemen Pekerjaan Umum.
- Baidya, R., Kumar Ghosh, S., & Parlikar, P. (2021). *Potential use of BF flue dust in replacing traditional fuel and raw materials in cement*

- production. *A.SPIRE Industrial Symbiosis Report*.
- Bar-Tal, A., Saha, U. K., Raviv, M., & Tuller, M. (2019). *Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixtures*. In M. Raviv, J. H. Lieth, & A. Bar-Tal (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice* (2nd ed., pp. 259–301). Elsevier.
- Davraz, M., et.al., (2020). *Development of Thermally Efficient Lightweight Materials using Coarse and Fine Perlite Aggregates*. *Journal of Building Engineering*.
- Dhanasingh Sivalinga, V., Devarajan, P., Ramalingam, B., Soudagar, M. E. M., Mohanavel, V., Khan, T. M. Y., Shahapurkar, K., & Cuce, E. (2024). *Current trends and biotechnology infused cleaner production of biomaterials for the construction industry: International Technologies, Journal A critical review. of 19, Low-Carbon 833–849.* <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad119>
- Dimitriou, A., dkk. (2023). *Perlite and rice husk ash re-use as fine aggregates in lightweight aggregate structural concrete*. *Sustainability*, 15(5), 4120.
- Duong, T. T., Hoang, M. D., & Tran, T. D. (2025). *Evaluation of carbon emission reduction in concrete using fly ash and slag: Case studies from Vietnam*. *Journal of Science and Transport Technology*, 5(3), 8197 <https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.en.5.3.81-97>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 3: *Industrial Processes and Product Use*). Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). *Institute for Global Environmental Strategies* (IGES) . <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- Jiang, Y., Ling, T. C., Shi, C., & Pan, S. Y. (2024). *Weathering treatments for improving the stability of steel slags in cement production*. *Journal of Cleaner Production*, 412, 125–138.
- Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 2014.
- Putra, R., dkk. (2024). *Low-carbon and recycled mineral composite materials for sustainable infrastructure: A comprehensive review*. *Sustainability*, 17(17), <https://doi.org/10.3390/su17177908>
- SNI. Badan Standardisasi Nasional. (1990). SNI 03-1971-1990: Metode pengujian kadar air agregat. Badan Standardisasi Nasional, 27(5), 6889.
- Standar Nasional Indonesia (SNI). (2008). Metode pengujian *slump* beton segar (SNI 1972:2008).
- Tezel, H., dkk. (2020). *Effects of boric acid additive to pumice aggregate lightweight concrete properties*. *International Journal of Science*.
- Torres-Ortega, R., Torres-Sanchez, D., & Lopez-Lara, T. (2024). *Mechanical properties of hydraulic concretes with partial replacement of Portland cement by pozzolans obtained from agro-industrial residues: A review*. *Heliyon*, 11(1), e41004. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e4100>
- Wu, M., dkk. (2022). *Hydration properties of high-volume fly ash cement containing superfine particles*. *Materials and Structures*, 55(4), 112.