

Studi Literatur Sistematis: Analisis Peran Abu Terbang dalam Pengembangan Teknologi Beton Ringan

Article History:

Received

12 Januari 2026

Revised

2 Februari 2026

Accepted

18 Maret 2026

HAIKAL PUTRA HABIBIE ALIFA^{1*}, ILMAN FATHALHUDA¹,
ARRAHMAH SYIFA RABBANI¹, RINA MARINA MASRI¹

¹Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

*Corresponding email: haikalputrahabibiealifa@upi.edu

ABSTRAK

Penelitian ini menyintesis hasil berbagai studi yang berfokus pada pengembangan beton ringan struktural (LWAC) berbasis limbah untuk mewujudkan material konstruksi berkelanjutan. Inovasi LWAC terutama mengoptimalkan penggunaan agregat alternatif berupa sintered fly ash aggregate (SFAA) dan agregat plastik daur ulang polipropilena (PPCA). Evaluasi dilakukan melalui studi eksperimental, mencakup pengujian sifat beton segar, kekuatan tekan, modulus elastisitas, serta karakteristik jangka panjang seperti susut dan rangkai pada sampel standar hingga elemen struktural skala besar. Dibandingkan dengan Beton Agregat Normal (NWAC), LWAC menunjukkan performa unggul, terutama formulasi SFAA yang mampu mencapai kekuatan tekan struktural sekaligus menurunkan massa jenis 20–30 persen. Selain itu, reologi LWAC meningkat dengan susut 36 persen lebih rendah dan koefisien rangkai 53 persen lebih rendah, menjadikannya ideal untuk aplikasi prategang. PPCA juga memenuhi kriteria kekuatan beton ringan struktural. Secara keseluruhan, LWAC berbasis limbah terbukti layak secara teknis dan ramah lingkungan.

Kata kunci: abu terbang, agregat, beton ringan, daur ulang, kuat tekan

ABSTRACT

This study synthesizes findings from various research focusing on the development of sustainable Lightweight Aggregate Concrete (LWAC) using waste-based materials. The innovation of LWAC primarily relies on alternative aggregates such as sintered fly ash aggregate (SFAA) and recycled polypropylene plastic aggregate (PPCA). The evaluation was carried out through experimental studies, including tests on fresh concrete properties, compressive strength, elastic modulus, and long-term characteristics such as shrinkage and creep, using specimens ranging from standard samples to full-scale prestressed beams. Compared with Normal-Weight Aggregate Concrete (NWAC), LWAC demonstrated superior performance, particularly the SFAA formulation, which achieved adequate structural compressive strength while reducing density by 20–30 percent. Furthermore, LWAC exhibited enhanced rheology with 36 percent lower shrinkage and 53 percent lower creep, making it highly suitable for prestressed applications. PPCA also satisfied the strength requirements of structural lightweight concrete. Overall, waste-based LWAC proved technically feasible and environmentally advantageous.

Keywords: fly ash, aggregate, lightweight concrete, recycling, compressive strength

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license



PENDAHULUAN

Beton merupakan material komposit yang tersusun dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan (*admixture*) yang mengalami reaksi hidrasi dan menghasilkan massa padat dengan sifat mekanik tertentu. Dalam beberapa dekade terakhir, penelitian dan pengembangan beton terus berfokus pada efisiensi material, peningkatan ketahanan, serta pengurangan dampak lingkungan. Perkembangan teknologi beton dalam beberapa dekade terakhir terus mengalami inovasi untuk menjawab tantangan global di sektor konstruksi, terutama terkait kebutuhan efisiensi material, pengurangan dampak lingkungan, serta peningkatan kinerja struktur. Beton konvensional yang memiliki densitas tinggi memang menawarkan kekuatan dan ketahanan yang baik, namun di sisi lain memberikan beban mati (*dead load*) yang besar terhadap struktur bangunan. Kondisi ini menuntut fondasi dan elemen struktur yang lebih besar, meningkatkan konsumsi material dan biaya konstruksi. Selain itu, produksi semen Portland yang merupakan bahan utama dalam beton menyumbang emisi karbon dioksida dalam jumlah signifikan, yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Oleh karena itu, inovasi menuju beton ringan yang ramah lingkungan menjadi fokus utama penelitian dan pengembangan material bangunan modern.

Beton ringan (*lightweight concrete*) hadir sebagai alternatif yang menjanjikan karena memiliki massa jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan beton konvensional, sehingga dapat mengurangi beban struktur tanpa mengorbankan kekuatan yang signifikan. Namun, dalam praktiknya, terdapat kesenjangan antara kondisi ideal dan kenyataan di lapangan. Secara ideal, beton ringan diharapkan memiliki densitas rendah, kekuatan yang memadai, serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan agresif. Akan tetapi, penurunan densitas sering kali diikuti dengan penurunan kekuatan tekan dan modulus elastisitas, serta peningkatan porositas dan penyusutan. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan beton ringan tidak cukup hanya dengan mengurangi berat jenis, tetapi juga membutuhkan pendekatan ilmiah untuk menjaga keseimbangan antara kinerja mekanik dan ketahanan jangka panjang.

Salah satu inovasi yang banyak dikaji dalam satu dekade terakhir adalah pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan pengganti sebagian semen atau agregat dalam beton ringan. Abu terbang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang memiliki sifat pozzolanik, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida membentuk senyawa yang meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton. Penggunaan *fly ash* tidak hanya mengurangi konsumsi semen dan limbah industri, tetapi juga meningkatkan *workability*, menurunkan panas hidrasi, serta memperbaiki ketahanan terhadap ion klorida dan sulfat. Beberapa penelitian terbaru menunjukkan hasil yang menjanjikan. Penggantian semen dengan abu terbang hingga 60% pada *ultrahigh-performance concrete* (UHPC) masih dapat menghasilkan kekuatan yang sebanding dengan beton konvensional pada umur lanjut [1].

Agregat ringan yang digunakan dalam beton ringan didefinisikan sebagai agregat dengan densitas butir kering tidak lebih dari 2.000 kg/m³, atau densitas curah (*bulk density*) dalam kondisi lepas tidak melebihi 1.200 kg/m³. Pemakaian agregat ringan bertujuan mengurangi berat jenis beton tanpa mengorbankan kekuatan dan durabilitas yang diperlukan dalam aplikasi struktural [2]. Namun, berkurangnya densitas ini sering diikuti dengan penurunan modulus elastisitas, peningkatan porositas, serta potensi keretakan mikro yang berdampak pada penurunan daya tahan jangka panjang.

Sementara itu, abu terbang (*fly ash*) telah menjadi salah satu bahan tambahan (pozzolan) paling umum digunakan dalam pengembangan beton modern. *Fly ash* adalah residu hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang tersusun atas partikel halus silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) dengan sifat pozzolanik, yaitu kemampuannya bereaksi dengan kalsium hidroksida dari hidrasi semen untuk membentuk senyawa pengikat seperti *calcium silicate hydrate* (C-S-H). Penambahan *fly ash* dalam beton dapat memperbaiki kepadatan mikrostruktur, menurunkan kebutuhan air, meningkatkan durabilitas, dan memperkecil permeabilitas beton [3].

Namun, kesenjangan antara kondisi ideal dan kenyataan di lapangan masih cukup lebar. Idealnya, beton ringan berbasis *fly ash* diharapkan memiliki densitas rendah, kekuatan

tinggi, serta ketahanan terhadap serangan kimia maupun cuaca ekstrem. Kenyataannya, peningkatan proporsi *fly ash* sering kali memperlambat waktu pengerasan, menurunkan kekuatan awal, atau menyebabkan variasi mutu akibat distribusi ukuran partikel yang tidak homogen. Beberapa studi melaporkan bahwa substitusi abu terbang di atas 50% dapat menurunkan kekuatan tekan jangka pendek dan mengurangi ketahanan terhadap siklus beku-cair serta penetrasi ion klorida [4]. Oleh karena itu, diperlukan inovasi desain campuran dan pendekatan teknologi material untuk menjembatani perbedaan antara performa teoretis dan kinerja nyata beton ringan berbasis *fly ash*. Penelitian ini mengadopsi metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menjawab tantangan yang ada. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menyintesis temuan-temuan riset ilmiah terbaru terkait aplikasi *fly ash* dalam inovasi beton ringan. Pendekatan SLR diutamakan karena kemampuannya dalam memetakan pengetahuan secara komprehensif dan objektif, sekaligus mengurangi potensi bias dalam peninjauan literatur.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan deskriptif-kualitatif. Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan perkembangan teknologi beton serta peran abu terbang dalam pembuatan beton ringan. Pendekatan dipilih karena mampu memberikan pemahaman yang komprehensif terhadap fenomena yang diteliti berdasarkan kondisi nyata di lapangan tanpa manipulasi variabel penelitian.

Data dikumpulkan dari berbagai sumber seperti jurnal ilmiah, prosiding, dan buku teks teknik sipil yang diterbitkan antara 2020–2025 melalui database Google Scholar, ScienceDirect, dan ResearchGate. Prosedur penelitian meliputi identifikasi topik, pengumpulan dan seleksi literatur yang relevan dengan beton ringan dan penggunaan abu terbang, serta analisis isi (*content analysis*) untuk menelaah tren, inovasi teknologi, dan pengaruh abu terbang terhadap sifat fisik dan mekanik beton. Hasil kajian kemudian disintesis guna menggambarkan perkembangan teknologi beton dan peran abu terbang dalam peningkatan kinerja serta keberlanjutan beton ringan.

Tabel 1. Data Teknis Struktur Gedung Hipotetik

Judul Artikel	Objek Penelitian	Tahun	Instrumen/Parameter	Hasil Utama
<i>Performance and comparative analysis of lightweight aggregate concrete: A comprehensive study</i>	Beton ringan (<i>Lightweight Aggregate Concrete - LWAC</i>) yang menggunakan variasi agregat ringan (LECA, <i>pumice</i> , <i>slag</i>).	2024	1. Kuat tekan 2. Kuat tarik belah 3. Densitas (berat jenis) 4. Absorpsi air	Beton ringan (densitas 1.450–1.850 kg/m ³) dapat mencapai kekuatan struktural yang cukup (18–32 MPa), 25% lebih ringan dari beton normal. Pemilihan agregat (seperti LECA) sangat krusial dalam menentukan kinerjanya.
<i>Performance of structural lightweight concrete produced by utilizing high volume of fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate with silica fume</i>	Beton agregat ringan (LWAC) menggunakan abu terbang (pengganti semen) dan cangkang laut hancur (pengganti pasir).	2021	1. Kuat tekan 2. Kuat tarik belah 3. Berat jenis 4. Penyerapan air dan porositas 5. Durabilitas (larutan sulfat) 6. <i>Slump test</i>	Kombinasi SFA, <i>cenosphere</i> , dan <i>silica fume</i> (10%) menghasilkan beton ringan struktural (1.700–1.850 kg/m ³) dengan kuat tekan > 30 MPa. <i>Silica fume</i> terbukti memperbaiki mikrostruktur dan kekuatan.

Tabel 1. Data Teknis Struktur Gedung Hipotetik lanjutan

Judul Artikel	Objek Penelitian	Tahun	Instrumen/Parameter	Hasil Utama
<i>Experimental study on the mechanical properties of lightweight aggregate concrete mixed with fly ash and shells</i>	Beton agregat ringan (LWAC) menggunakan abu terbang (pengganti semen) dan cangkang laut hancur (pengganti pasir).	2025	1. Variabel: rasio abu terbang dan rasio cangkang. 2. Pengujian (28 hari): kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur. 3. Analisis mikrostruktur (SEM).	Kombinasi optimal 5% abu terbang dan 10% cangkang menghasilkan sifat mekanik (kuat tekan, tarik, lentur) yang lebih baik dibandingkan beton kontrol. Pada rasio ini, kuat tekan meningkat 2,7% dan kuat lentur 4,6%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan studi literatur sistematis, analisis temuan terkait pemanfaatan abu terbang beton ringan difokuskan pada tiga aspek fundamental yang saling terkait, yakni karakteristik dasar, peran ganda abu terbang, serta upaya peningkatan kinerjanya.

Karakteristik Dasar dan Trade-Off Beton Ringan Berbasis Abu Terbang

Penggunaan agregat berbasis abu terbang (*fly ash aggregate*) telah teridentifikasi sebagai salah satu inovasi material yang efektif dalam upaya menurunkan berat jenis beton secara signifikan tanpa mengorbankan kinerja strukturalnya. Agregat ini umumnya diproduksi melalui proses pelletization atau pembentukan butiran, di mana abu terbang dicampur dengan air dan bahan pengikat seperti semen atau *lime*, kemudian dikeringkan atau dibakar hingga mencapai kekuatan tertentu. Proses ini

menghasilkan agregat buatan dengan porositas tinggi dan berat jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan agregat alami, sehingga berdampak langsung terhadap penurunan densitas beton. Penambahan FA dapat meningkatkan *workability* (kemudahan pengerjaan) beton segar [5].

Inovasi material ini menghasilkan beton ringan dengan densitas yang umumnya berkisar antara 1.450 kg/m³ hingga 1.850 kg/m³. Nilai tersebut merepresentasikan penurunan massa sekitar 25% jika dibandingkan dengan beton normal konvensional [6]. Dari perspektif kinerja mekanis, material komposit ini terbukti mampu mencapai kuat tekan yang memadai untuk memenuhi persyaratan aplikasi struktural. Penelitian menunjukkan bahwa nilai kuat tekan yang dapat dicapai berada dalam rentang 19 MPa hingga melampaui 35 MPa, menegaskan viabilitasnya sebagai material konstruksi penopang beban [7].

Tabel 2. Nilai Kuat Tekan Campuran Beton yang Berbeda dengan FAC, SFA, dan SF

Concrete Mix	Compressive strength 7-day [MPa]	Compressive strength 28-day [MPa]	Compressive strength 90-day [MPa]
S0C0A0	21,35	32,7	35,55
S0C75A75	14,5	22,44	24,23
S0C75A100	14	20,55	21,58
S0C100A75	12,65	18,9	20,08
S0C100A100	11,3	17,57	19,1
S10C75A75	21,56	32,2	35,3
S10C75A100	19,4	29,11	31,2
S10C100A75	18,55	28,33	30,1
S10C100A100	17,7	26,5	27,8
S12C75A75	24,2	36,2	37,8
S12C75A100	21,33	32	33,6
S12C100A75	19,2	29,2	31,2

S12C100A100	18,2	27,4	28,8
-------------	------	------	------

Tabel 2. Perbandingan Periode Getar Alami Struktur lanjutan

Concrete Mix	Compressive strength 7-day [MPa]	Compressive strength 28-day [MPa]	Compressive strength 90-day [MPa]
S15C75A75	20,4	30,54	31,7
S15C75A100	18	17,26	28,8
S15C100A75	16,44	24,53	25,9
S15C100A100	15,11	22,55	24,1

Meskipun demikian, terdapat sebuah konsekuensi yang harus dipertimbangkan dari modifikasi densitas tersebut. Penurunan berat jenis yang substansial ini sering kali diikuti dengan peningkatan porositas internal material yang diakibatkan oleh struktur fisik dari agregat abu terbang itu sendiri [8]. Implikasi langsung dari peningkatan porositas ini adalah kecenderungan beton ringan untuk memiliki daya serap air (*water absorption*) dan tingkat permeabilitas yang lebih tinggi daripada beton normal. Meskipun penambahan *fly ash* hingga 20% merupakan titik optimal untuk menurunkan densitas papan beton ringan, peningkatan kadar tersebut juga menaikkan porositas, yang menjadi pertimbangan penting untuk aspek durabilitas [9]. Fenomena ini menghadirkan tantangan teknis yang utama, khususnya terkait aspek durabilitas jangka panjang dan ketahanan material terhadap penetrasi agen-agen agresif dari lingkungan.

Peran Ganda Abu Terbang: Agregat dan Bahan Tambah Semen (SCM)

Dalam konteks pengembangan teknologi beton ringan, abu terbang (*fly ash*) menunjukkan fungsionalitas ganda yang unik, yakni sebagai bahan baku agregat ringan buatan dan sebagai bahan tambah semen (*Supplementary Cementitious Material* atau SCM). Pertama, sebagai agregat ringan buatan, abu terbang dapat diproses menjadi berbagai bentuk seperti *sintered* (SFA/SFAA), *ceramsite*, atau *pelletized* sebagai pengganti agregat kasar konvensional. Penggunaan *sintered fly ash aggregate* (SFA) terbukti mampu memberikan kekuatan struktural yang cukup tinggi. Selain itu, material seperti *fly ash cenosphere* berkontribusi lebih besar pada pengurangan berat secara signifikan. Inovasi lebih lanjut bahkan telah mengembangkan agregat polimer buatan yang menggabungkan abu terbang dengan resin untuk aplikasi spesifik seperti infrastruktur biomedis [10]. Lebih lanjut, penggunaan *fly ash* sebagai *supplementary cementitious material* (SCM) mampu menurunkan jejak karbon beton

secara signifikan dan tetap mempertahankan sifat mekanik bila digunakan pada kadar optimum antara 20–40 % [11].

Kedua, ketika digunakan sebagai bahan tambah semen (*Supplementary Cementitious Material* atau SCM), abu terbang memberikan manfaat ganda. Dapat secara signifikan meningkatkan *workability* atau kemudahan pengerjaan beton, terutama pada campuran yang sulit diolah seperti yang menggunakan agregat plastik daur ulang [12]. Selain itu, penggunaannya sebagai pengganti sebagian semen dapat mengurangi konsumsi semen secara keseluruhan, yang berkontribusi langsung pada aspek keberlanjutan. Kinerjanya sebagai SCM juga dievaluasi dalam beton alkali aktif (*alkali-activated concrete*), di mana kombinasi abu terbang dan terak tanur tinggi (*slag*) menunjukkan potensi sebagai alternatif beton Portland konvensional [13]. Penggunaannya bersama material pozolan lain seperti *silica fume* dan metakaolin pada beton yang menggunakan agregat bata bekas juga menunjukkan peningkatan performa yang signifikan [14]. Penggunaan FA sebagai SCM hingga 20% umumnya bermanfaat untuk sifat mekanik (jangka panjang) dan durabilitas, tetapi memiliki kelemahan utama berupa kekuatan awal yang lambat (*slow early strength*) [15].

Peningkatan Kinerja Melalui Sinergi Material Lain

Inovasi dalam teknologi beton ringan modern sangat berfokus pada substitusi material konvensional dengan limbah industri dan bahan daur ulang untuk meningkatkan aspek keberlanjutan. Sebuah penelitian telah mengeksplorasi penggantian ganda, di mana abu terbang (*fly ash*) digunakan sebagai substitusi parsial semen dan limbah cangkang laut dimanfaatkan sebagai pengganti pasir, dengan tujuan mengoptimalkan sifat mekanik beton agregat ringan (LWAC) [16]. Pendekatan berbeda diambil dalam pengembangan beton geopolimer ringan berkekuatan tinggi

(HSLWGC) yang sepenuhnya menggantikan semen, dengan mengombinasikan *fly ash* (FA), *metakaolin* (MK), dan agregat abu terbang sinter (SFA) untuk meningkatkan kinerja mekanik serta durabilitas terhadap korosi [17]. Selain limbah industri, limbah konsumsi seperti agregat daur ulang *Polyethylene Terephthalate* (PET) juga telah diteliti, di mana penggunaannya dalam mortar ringan dikombinasikan dengan 15% *fly ash* (FA) dan *admixture (superplasticizer)* untuk menghasilkan material *eco-efficient* yang tahan lama [18].

Paralel dengan modifikasi desain campuran, penelitian juga terkonsentrasi pada peningkatan fungsionalitas dan kualitas agregat itu sendiri. Sebagai contoh, sebuah metode penguatan untuk agregat ringan tanpa abu terbang (FULA) telah dikembangkan menggunakan perendaman dalam larutan alkali (NaOH), yang terbukti efektif meningkatkan tingkat hidrasi abu terbang dan kekerasan mikro pada zona transisi antarmuka (ITZ) [19]. Pendekatan fungsional yang berbeda dievaluasi menggunakan agregat ringan halus (FLWA) yang diproduksi dari limbah abu batubara (WCA); agregat ini didesain dalam kondisi pra-jenuh (*pre-wetted*) untuk berfungsi sebagai agen *Internal Curing* (IC) yang efektif, terbukti mampu mengurangi penyusutan otogen beton secara substansial hingga ~45% [20]. Hasil serupa juga ditemukan bahwa beton ringan dengan volume tinggi abu terbang menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dengan bahan tambahan seperti *attapulgit* dapat meningkatkan kekuatan tekan serta mengurangi penyusutan plastik [21]. Seiring meningkatnya tuntutan akan konstruksi yang berkelanjutan, inovasi material yang menggabungkan karakteristik ringan dengan dampak lingkungan yang rendah kini menjadi prioritas utama. Beton ringan yang diproduksi dengan styrofoam dan *fly ash* menjadi solusi yang lebih ekologis (memanfaatkan limbah) dan bermutu lebih tinggi (berkat *fly ash*), yang membuatnya potensial untuk konstruksi nonstruktural atau struktural ringan [22].

KESIMPULAN

Penggunaan agregat berbasis *fly ash* merupakan strategi efektif untuk memproduksi *Lightweight Aggregate Concrete* (LWAC), dengan penurunan kepadatan signifikan hingga 25% (kisaran 1.450–1.850 kg/m³) dibandingkan dengan beton normal, sambil tetap mempertahankan kuat tekan struktural (19 MPa

hingga >35 MPa). Namun, modifikasi material ini membawa konsekuensi *trade-off* berupa peningkatan porositas internal LWAC yang meningkatkan daya serap air dan permeabilitas, sehingga menimbulkan tantangan besar terkait durabilitas jangka panjang.

Fly ash memiliki peran ganda dalam teknologi beton. Pertama, sebagai agregat ringan buatan seperti *Sintered Fly Ash Aggregate* (SFAA), *ceramsite*, atau *pelletized*, yang mengurangi berat jenis beton dan tetap memberikan kekuatan struktural tinggi, bahkan meluas ke agregat polimer buatan untuk aplikasi biomedis. Kedua, sebagai *Supplementary Cementitious Material* (SCM), *fly ash* meningkatkan *workability* sekaligus menurunkan jejak karbon beton karena dapat menggantikan sebagian semen. Dalam peran SCM, *fly ash* efektif pada beton Portland maupun sistem alternatif seperti *alkali-activated concrete*, sering disinergikan dengan *silica fume* untuk optimasi performa.

Peningkatan kinerja dan keberlanjutan LWAC dicapai melalui substitusi material komprehensif, seperti penggantian semen dengan *fly ash* dan penggantian pasir dengan limbah cangkang laut, atau pengembangan beton geopolimer berkekuatan tinggi bebas semen dengan kombinasi *fly ash* dan metakaolin. Kualitas agregat juga ditingkatkan melalui perendaman larutan alkali atau desain agregat ringan pra-jenuh untuk bertindak sebagai *Internal Curing* (IC) yang terbukti efektif menurunkan penyusutan otogenik.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] Hawileh, R. A., Shaw, S. K., Assad, M., Dey, A., Abdalla, J. A., & Kim, J. H. (2025). Influence of Fly Ash on the Compressive Strength of Ultrahigh-Performance Concrete: A State-of-the-art Review Towards Sustainability. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 19(1), 1-28.
- [2] Piechaczek, M., Ostrowski, K. A., & Furtak, K. (2025). Lightweight Aggregate Concrete with Regard to Bridge Structures—State of the Art. *Materials*, 18(16), 3874.
- [3] Zhang, Z. (2023). Review on the Role of Ultra-fine Fly Ash on the Performance of Concrete. *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(7), 94-100.
- [4] Priastiwi, Y. A., Wibowo, H., Puwanto, P., Hidayat, A., Ulayya, I., & Carita, N. (2024).

- Pengaruh Air Laut terhadap Kuat Tekan, Permeabilitas, dan Mikrostruktur Beton Geopolimer dengan Flyash dan Tanah Putih sebagai Pengganti Semen. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 30(1), 65-74.
- [5] Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. *Journal of King Saud University-Science*, 33(6), 101536.
- [6] Arunkumar, G. E., & Zaffir, M. N. (2024). Performance and comparative analysis of lightweight aggregate concrete: A comprehensive study. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 12(3),
- [7] Majhi, R. K., Padhy, A., & Nayak, A. N. (2021). Performance of structural lightweight concrete produced by utilizing high volume of fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate with silica fume. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100121.
- [8] Abbas, W. A., & Abbas, M. L. (2023). Physico-durability aspects of partial substitution via pelletized fly ash lightweight nano-silica concrete. *Res. Eng. Struct. Mater.*, 9(2), 475-491.
- [9] Aulia, H., & Mahyudin, A. (2024). Pengaruh Persentase Fly ash terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Papan Beton Ringan dengan Filler Serat Sabut Pinang. *Jurnal Fisika Unand*, 13(4), 452-458.
- [10] Firda, A., Permatasari, R., Jimmyanto, H., & Ammarullah, M. I. (2025). Artificial Polymer Lightweight Aggregate Concrete With Coal Fly Ash for Biomedical Infrastructure: Mechanical, Physical, and Microstructural Investigation. *Engineering Reports*, 7(6), e70196.
- [11] Chen, Z., Li, M., & Guan, L. (2024). Safety and effect of fly ash content on mechanical properties and microstructure of green low-carbon concrete. *Applied Sciences*, 14(7), 2796.
- [12] Abirami, T., Bandara, C. S., Yapa, H. D., & Dissanayake, P. B. R. (2025, 19 Agustus). *Feasibility assessment of using recycled plastic as a complete replacement for coarse aggregate in structural lightweight concrete*. Society of Structural Engineers, Sri Lanka - Annual Sessions 2025, Colombo, Sri Lanka
- [13] Wang, H., Wu, Y., Wang, L., Chen, H., & Cheng, B. (2021). Properties of a Lightweight Fly Ash-Slag Alkali-Activated Concrete with Three Strength Grades. *Applied Sciences*, 11(2), 766.
- [14] Hussein, Y. M., Abd Elrahman, M., Elsakhawy, Y., Tayeh, B. A., & Tahwia, A. M. (2022). Development and performance of sustainable structural lightweight concrete containing waste clay bricks. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 4344-4359.
- [15] Li, G., Zhou, C., Ahmad, W., Usanova, K. I., Karelina, M., Mohamed, A. M., & Khallaf, R. (2022). Fly ash application as supplementary cementitious material: a review. *Materials*, 15(7), 2664.
- [16] Deng, P., Zhou, Y., Wang, J., Liu, Y., Wang, X., & Tan, C. (2025). Experimental study on the mechanical properties of lightweight aggregate concrete mixed with fly ash and shells. *Cement Wapno Beton*, 29(5), 375-393.
- [17] Rawat, R., & Pasla, D. (2025). Corrosion Performance and Sustainability of high-strength lightweight geopolimer concrete incorporating sintered fly ash aggregate as the coarse aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, e05379.
- [18] Sathe, S., & Rathod, R. (2025). Experimental investigation of structural lightweight mortars containing waste PET aggregates. *Discover Civil Engineering*, 2(1), 156.
- [19] Liu, J., Xu, Z., & Ji, Y. (2024). Effect of Strengthening Mechanism of Alkali Curing on Mechanical Properties of Fly Ash Lightweight Aggregates and Its Concrete. *Materials*, 18(1), 89.
- [20] Alqenai, Y., Tejuoso, B., & Farnam, Y. (n.d.). *Assessing the Performance of Internal Cured Concrete Using Pre-Saturated Fine Lightweight Aggregates Manufactured from*
- [21] Abdulhussein, F. K., Beddu, S., Mohhamed, D. B., Al-Hubboubi, S., & Abbas, H. (2024). A Review on the Mechanical Performance of High-Volume Fly Ash Light-Weight Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(5), 17524-17531.
- [22] Setiawan, D. B., & Abdillah, R. A. (2023). Perilaku Mekanik Beton Ringan Agregat Styrofoam Dengan Variasi Penambahan Fly ash. *Bangun Rekaprima*, 9(1), 88-98.