Empiricism Journal
https://journal-center.litpam.com/index.php/empiricism
email: empiric.journal@gmail.com

Vol. 6, No 2, June 2025
e-ISSN: 2745-7613
pp. 359-370

Pemanfaatan *Fly Ash* dan Pasir Tayan dalam *High Performance Concrete* (HPC): Studi Kasus Proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung

Iskandar[1]*, Suryadi[2], Febrian Ramadhan[3]
Program Teknik Sipil, Sekolah Pascasarjana, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Jakarta Barat, Indonesia 11750.
Email Korespondensi: iskandar.purba@itpln.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan mengoptimalkan formulasi High Performance Concrete (HPC) melalui pemanfaatan fly ash dari PLTU Suralaya sebagai bahan substitusi semen dan pasir Sungai Kapuas (Pasir Tayan, Kalimantan Barat) sebagai agregat halus, guna menghasilkan beton yang memenuhi standar teknis internasional serta mendukung keberlanjutan konstruksi. Metodologi yang digunakan mengacu pada standar Tiongkok seperti TB/T 3275-2011, TJ/GW 158-2018, dan JGJ 55-2011, dengan fokus pada desain komposisi campuran beton berdasarkan karakteristik lingkungan proyek dan hasil uji teknis material. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fly ash Suralaya memiliki kehalusan, komposisi kimia, dan reaktivitas pozzolan yang sesuai dengan standar teknis, serta mampu meningkatkan performa beton dari aspek kekuatan jangka panjang dan daya tahan terhadap lingkungan agresif. Sementara itu, dari berbagai sumber pasir yang diuji, hanya pasir Sungai Kapuas yang memenuhi seluruh persyaratan agregat halus untuk HPC menurut standar TB 3275-2011, menandakan perlunya eksplorasi lebih lanjut terhadap quarry lokal lain yang potensial. Simpulan dari kajian ini merekomendasikan pemanfaatan optimal fly ash dan agregat lokal sebagai strategi efisiensi biaya, pengurangan emisi karbon, serta peningkatan kualitas dan keberlanjutan dalam proyek infrastruktur berskala nasional seperti KCJB.

Kata kunci: Fly Ash; FABA; High Performance Concrete; Pasir Tayan; Infrastruktur Berkelanjutan.

Utilization of Fly Ash and Tayan Sand in High Performance Concrete (HPC): A Case Study from the Jakarta–Bandung High-Speed Railway Project

Abstract

This study aims to analyze and optimize the formulation of High Performance Concrete (HPC) by utilizing fly ash from the Suralaya coal-fired power plant as a cement substitute and Kapuas River sand (Tayan sand, West Kalimantan) as fine aggregate, to produce concrete that meets international technical standards and supports sustainable construction. The methodology follows Chinese standards such as TB/T 3275-2011, TJ/GW 158-2018, and JGJ 55-2011, focusing on concrete mix design based on project environmental conditions and technical testing of materials. Test results show that Suralaya fly ash has fineness, chemical composition, and pozzolanic reactivity consistent with technical standards, enhancing the concrete's long-term strength and durability against aggressive environments. Among various sand sources tested, only Kapuas River sand meets all fine aggregate requirements for HPC according to TB 3275-2011, indicating the need for further exploration of other potential local quarries. The study concludes by recommending the optimal use of fly ash and local aggregates as a cost-efficient, carbon-reducing strategy to improve quality and sustainability in large-scale national infrastructure projects such as KCJB.

Keywords: *Fly Ash; FABA; High Performance Concrete; Tayan Sand; Sustainable Infrastructure*.

How to Cite: Iskandar, I., Suryadi, S., & Ramadhan, F. (2025). Pemanfaatan Fly Ash dan Pasir Tayan dalam High Performance Concrete (HPC): Studi Kasus Proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung. *Empiricism Journal*, *6*(2), 359–370. https://doi.org/10.36312/ej.v6i2.2745

https://doi.org/10.36312/ej.v6i2.2745

Copyright© 2025, Iskandar et al.
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

PENDAHULUAN

Dalam mendukung percepatan pembangunan infrastruktur nasional yang berkelanjutan, penggunaan material konstruksi alternatif berbasis limbah industri dan sumber daya lokal menjadi fokus penting dalam inovasi teknik sipil (Ghozali et al., 2020). Proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB), sebagai Proyek Strategis Nasional pertama di Asia Tenggara, mengadopsi teknologi High Performance Concrete (HPC) yang ramah

lingkungan. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah pemanfaatan fly ash dari PLTU Suralaya sebagai bahan substitusi semen, yang terbukti dapat meningkatkan kelecakan beton serta mencapai kekuatan tekan hingga 36,6 MPa pada umur 28 hari (Ghozali et al., 2020). Selain itu, penggunaan fly ash juga dapat mengurangi kebutuhan air hingga 27% dibandingkan dengan beton tanpa fly ash (Pangestu & Kurniawan, 2019). Meskipun demikian, informasi terkait penggunaan pasir Sungai Kapuas (Tayan, Kalimantan Barat) sebagai agregat halus utama masih terbatas dan memerlukan kajian lebih lanjut. Studi ini bertujuan untuk mengoptimalkan formulasi beton HPC melalui integrasi material lokal yang memenuhi standar teknis internasional, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku konvensional. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi beton masa depan yang tangguh, ekonomis, dan berkelanjutan di Indonesia.

Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB) ditetapkan sebagai Proyek Strategis Nasional (PSN) melalui Peraturan Presiden No. 107 Tahun 2015 tertanggal 6 Oktober 2015, yang bertujuan mempercepat pembangunan sarana dan prasarana transportasi antara Jakarta dan Bandung. Proyek ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas layanan transportasi guna mendukung pertumbuhan kawasan metropolitan Jakarta-Bandung (Perpres 107, 2015). Jalur KCJB membentang sepanjang 142,3 km, menghubungkan Stasiun Halim hingga Stasiun Tegalluar, dengan waktu tempuh hanya 45 menit.

Struktur Proyek Kereta Cepat Jakarta Bandung dirancang untuk memiliki umur layanan hingga 100 tahun, sehingga membutuhkan material konstruksi yang kuat dan tahan lama, seperti *High Performance Concrete* (HPC) (Aitchin, 2003). HPC adalah jenis beton dengan karakteristik unggul dibandingkan beton konvensional, dirancang untuk memenuhi tuntutan teknis yang lebih tinggi serta kemudahan pelaksanaan.

High Performance Concrete (HPC) memiliki sejumlah ciri khas yang menjadikannya unggul dibandingkan beton konvensional, terutama dalam proyek-proyek konstruksi berskala besar dan berstandar tinggi seperti Kereta Cepat Jakarta–Bandung. Salah satu karakteristik utamanya adalah kekuatan awal yang tinggi, yang memungkinkan percepatan waktu pengerjaan struktur. Selain itu, HPC memiliki faktor air-semen (FAS) yang rendah, sehingga menghasilkan beton yang lebih padat dan kuat. Beton jenis ini juga dikenal memiliki modulus elastisitas yang tinggi dan daya tahan terhadap abrasi, menjadikannya ideal untuk struktur yang mengalami beban dinamis atau gesekan berulang. Dari segi aplikatif, HPC mudah dicampur, dipompa, dan dicetak tanpa mengalami segregasi, sehingga sangat efisien dalam pelaksanaan di lapangan. Stabilitas volumenya pun sangat baik, dengan tingkat susut plastis yang minimal. Di samping itu, HPC dirancang untuk tahan terhadap serangan kimia dan memiliki sifat kedap air yang tinggi, yang penting untuk daya tahan jangka panjang. Keunggulan estetika serta biaya pemeliharaan yang rendah juga menjadikan HPC sebagai pilihan material yang tidak hanya kuat, tetapi juga ekonomis dan efisien untuk berbagai jenis infrastruktur modern.

Peraturan teknis beton yang dijadikan acuan dalam proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB) tidak hanya mengandalkan standar nasional, tetapi juga merujuk pada standar internasional, khususnya dari Tiongkok. Salah satu regulasi utama yang digunakan adalah TB/T 3275 (2011): Concrete for Railway Engineering, yang memberikan fleksibilitas lebih besar dalam penggunaan material tambahan seperti fly ash. Dalam standar ini, penggunaan fly ash diperbolehkan hingga mencapai 50% dari total pengganti semen, bergantung pada kondisi lingkungan setempat dan rasio faktor air-semen yang digunakan. Hal ini menunjukkan tingkat adaptabilitas yang tinggi terhadap material berbasis limbah industri dan mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan. Sebaliknya, standar nasional Indonesia, yaitu SNI 2847 (2019) tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, masih membatasi penggunaan fly ash maksimal hanya sampai 25%, mencerminkan pendekatan yang lebih konservatif dalam pemanfaatan bahan tambahan semen (SCM) di dalam negeri. Perbedaan ini menunjukkan adanya kesenjangan antara standar domestik dan praktik yang diterapkan dalam proyek strategis yang berkolaborasi dengan mitra luar negeri.

Sebagai proyek kereta cepat pertama di Asia Tenggara, KCJB juga mengacu pada standar lainnya dari Tiongkok yaitu JGJ 55 (2011): Specification for Mix Proportion Design of Ordinary Concrete, khusus untuk desain campuran beton. Standar ini memiliki sejumlah

pendekatan teknis yang berbeda dari SNI, terutama dalam hal penentuan kekuatan tekan target, rasio faktor air-semen, serta komposisi mortar semen yang lebih kompleks dan adaptif terhadap performa beton yang diinginkan. Misalnya, JGJ 55-2011 lebih menekankan pada optimalisasi performa beton jangka panjang melalui pengujian dan verifikasi karakteristik campuran, bukan sekadar melalui batasan campuran proporsional seperti dalam praktik umum di Indonesia. Dengan menggunakan pendekatan tersebut, campuran beton dalam proyek KCJB mampu menghasilkan High Performance Concrete (HPC) yang tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga lebih efisien dalam penggunaan material.

Karena penggunaan HPC dengan kadar fly ash tinggi masih tergolong baru dan belum banyak diterapkan dalam proyek konstruksi di Indonesia, pengalaman dari KCJB menjadi sangat berharga. Proyek ini dapat dijadikan sebagai benchmark atau acuan awal bagi pengembangan teknologi beton nasional ke arah yang lebih maju dan ramah lingkungan. Penerapan standar internasional dalam proyek ini juga dapat membuka peluang untuk revisi atau harmonisasi standar nasional, sehingga lebih adaptif terhadap kemajuan teknologi material dan kebutuhan konstruksi berkelanjutan di masa depan. Selain itu, keberhasilan KCJB dalam memanfaatkan material lokal dan limbah industri secara optimal bisa menjadi inspirasi dan rujukan praktis bagi proyek-proyek infrastruktur lainnya di Indonesia, seperti jalan tol, jembatan, pelabuhan, dan gedung bertingkat tinggi.

Seiring dengan percepatan pembangunan infrastruktur nasional guna mendorong pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan menuju visi Indonesia Emas 2045, berbagai proyek kini dirancang dan dibangun dengan standar kualitas yang lebih tinggi, yang mengedepankan aspek inovasi, adaptivitas, keberlanjutan, kesetaraan gender, inklusivitas, keadilan sosial, serta nilai-nilai luhur bangsa. Dalam konteks ini, High Performance Concrete (HPC) yang telah sukses diimplementasikan pada Proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB) dapat menjadi solusi strategis dan berdaya saing tinggi untuk mendukung pembangunan infrastruktur masa depan Indonesia. Pengalaman dari KCJB menunjukkan bahwa HPC tidak hanya mampu menjawab tuntutan teknis dan lingkungan proyek berskala besar, tetapi juga membuka peluang penerapan material konstruksi yang lebih efisien, tahan lama, dan ramah lingkungan di berbagai proyek pembangunan nasional lainnya.

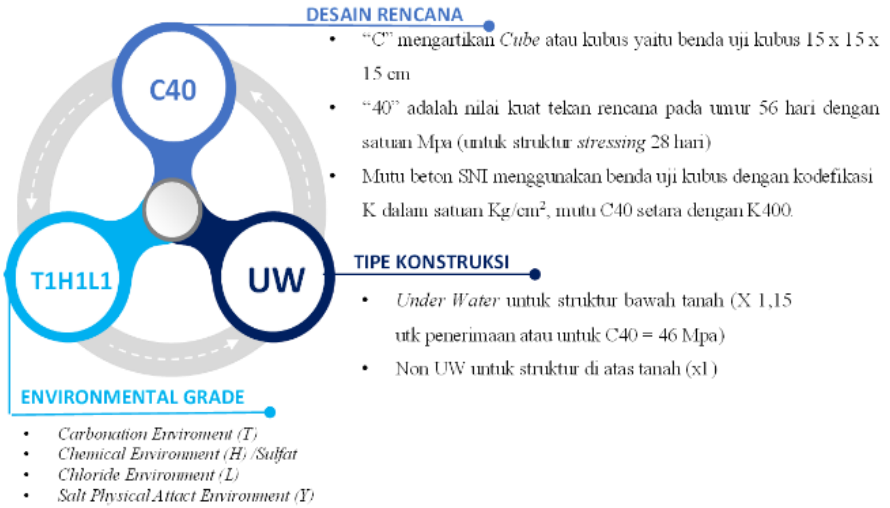
Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan mengoptimalkan formulasi High Performance Concrete (HPC) melalui pemanfaatan fly ash dari PLTU Suralaya dan pasir Sungai Kapuas (Pasir Tayan, Kalimantan Barat) sebagai bahan substitusi semen dan agregat halus dalam campuran beton. Tujuannya adalah untuk menghasilkan beton HPC yang tidak hanya memenuhi standar teknis internasional, tetapi juga meningkatkan aspek keberlanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada bahan baku konvensional. Selain itu, penelitian ini ingin mengevaluasi performa mekanik dan durability beton hasil formulasi tersebut, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi beton ramah lingkungan dan ekonomis di Indonesia, khususnya pada proyek-proyek infrastruktur strategis di masa depan.

METODE

Metode Perencanaan Komposisi Kondisi

High Performance Concrete (HPC) yang mengacu pada standar Tiongkok memiliki sejumlah perbedaan mendasar dibandingkan dengan beton konvensional yang umum digunakan di Indonesia. Standar Tiongkok tidak hanya menitikberatkan pada kekuatan tekan (*compressive strength*), tetapi juga menekankan pada daya tahan beton terhadap pengaruh lingkungan eksternal, seperti kelembapan, zat kimia agresif, perubahan suhu ekstrem, serta keausan mekanis. Pendekatan ini mencerminkan upaya menyelaraskan performa teknis beton dengan tuntutan masa pakai jangka panjang dan keberlanjutan infrastruktur.

Selain itu, sistem penamaan dan pengkodean mutu beton dalam standar Tiongkok dilakukan secara lebih terstruktur dan holistik, mencakup tidak hanya klasifikasi kekuatan, tetapi juga parameter ketahanan lingkungan dan komposisi material. Informasi lebih lanjut terkait klasifikasi mutu beton tersebut dapat dilihat dalam infografis berikut.



Gambar 1. Kodefikasi Beton

Setiap kondisi lingkungan memiliki karakteristik tersendiri yang secara langsung memengaruhi kinerja dan daya tahan beton terhadap degradasi akibat faktor eksternal seperti kelembapan, kadar sulfat, kadar klorida, dan perubahan suhu. Oleh karena itu, desain campuran beton perlu disesuaikan dengan tingkat agresivitas lingkungan di lokasi proyek.

Lebih lanjut, setiap lokasi proyek dapat memiliki tingkat *environmental grade* yang berbeda-beda, bergantung pada hasil penyelidikan tanah (*Soil Investigation*) yang dilakukan secara spesifik di titik tersebut. Hasil investigasi ini menjadi acuan penting dalam menentukan spesifikasi teknis beton, agar struktur yang dibangun memiliki umur layan yang optimal dan risiko kerusakan yang minimal dalam jangka panjang.

Perhitungan komposisi campuran beton dengan menggunakan standard Tiongkok harus mengacu kepada persyaratan-persyaratan yang ada di peraturan TB/T 3275-2011 : *Concrete for Railway Engineering* (Aitchin, 2003), TJ/GW 158 (2018) : *The Tentative Technical Requirements of High Performance Concrete on Bridge-Tunnel and Subgrade Structure of Jakarta-Bandung High Speed Railway*, dan JGJ 55 (2011) : *Specification for Mix Proportion Design of Ordinary Concrete*. Untuk melakukan perhitungan komposisi campuran beton diperlukan hasil pengujian masing-masing material yang akan digunakan.

Material penyusun *High Performance Concrete* (HPC) terdiri dari:

a. Binder
b. Agregat halus
c. Agregat kasar
d. Admixture
e. Air

Pemanfaatan *fly ash* dan *agregat* halus (pasir) yang memiliki karakteristik teknis khusus, serta berbeda secara signifikan dari material beton yang lazim digunakan dalam praktik konstruksi konvensional di Indonesia. Baik *fly ash* maupun pasir yang digunakan dalam konteks ini harus memenuhi standar performa tinggi, termasuk dalam hal komposisi kimia, gradasi, tingkat absorpsi, dan kekasaran permukaan, guna memastikan beton yang dihasilkan mampu mencapai mutu tinggi, ketahanan jangka panjang, serta kinerja optimal dalam berbagai kondisi lingkungan ekstrem. Pendekatan ini menandai pergeseran paradigma dalam pemilihan material beton dari sekadar memenuhi spesifikasi dasar menuju penerapan material berdaya saing global yang mendukung infrastruktur berkelanjutan dan berumur panjang.

Binder

Material *binder* berperan sebagai komponen utama dalam campuran beton yang berfungsi untuk mengikat *agregat* halus, *agregat* kasar, dan air, sehingga membentuk massa beton yang *solid* dan homogen. *Binder* tidak hanya menentukan kekuatan struktural beton, tetapi juga berpengaruh terhadap *durabilitas*, *workability*, serta waktu pengerasan.

Komposisi *binder* umumnya terdiri dari semen *portland* sebagai bahan utama, yang dapat dikombinasikan dengan bahan tambahan (mineral *admixture*) seperti *fly ash*, *slag* (tanur tinggi), dan *silica fume*. Penggunaan bahan-bahan ini tidak hanya membantu mengurangi konsumsi semen, tetapi juga meningkatkan performa beton dalam hal kekuatan jangka panjang, ketahanan terhadap serangan kimia, dan pengendalian panas hidrasi, terutama pada proyek berskala besar atau dengan spesifikasi teknis tinggi seperti *High Performance Concrete* (HPC).

Fly Ash

Fly Ash merupakan residu halus hasil pembakaran batu bara, yang umumnya dihasilkan dari proses operasional Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Material ini termasuk dalam kategori *pozzolan*, yang memiliki sifat reaktif ketika bercampur dengan kalsium hidroksida dan air. Dalam industri konstruksi, *fly ash* banyak dimanfaatkan sebagai bahan substitusi *parsial* semen dalam campuran beton.

Penggunaannya terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan tekan jangka panjang, meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan kimia seperti sulfat dan klorida, serta mengurangi permeabilitas, yang pada akhirnya memperpanjang umur struktur beton. Selain itu, penggunaan *fly ash* juga berkontribusi pada aspek keberlanjutan karena mengurangi emisi karbon dari produksi semen dan memanfaatkan limbah industri menjadi material bernilai tambah.

Fly ash masuk kedalam kategori material *pozzolan* yaitu material *siliceous* atau *aluminous* yang didalamnya terdapat sedikit sekali atau bahkan tidak sama sekali material *cementitious* seperti yang dimiliki semen *portland* (Martin et al., 2014). *Fly Ash* dapat berfungsi sebagai bahan *aditif* dalam beton bisa sebagai pengisi (*filler*) yang akan menambah internal kohesi dan mengurangi porositas daerah transisi yang merupakan daerah terkecil dalam beton sehingga beton bisa menjadi lebih kuat (Mira, 2018).

Salah satu jenis *fly ash* yang digunakan dalam Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB) adalah *fly ash* yang berasal dari PLTU Suralaya. Pemilihan material ini didasarkan pada hasil serangkaian uji teknis yang menunjukkan bahwa *fly ash* tersebut memenuhi seluruh spesifikasi teknis dan standar kualitas yang dipersyaratkan untuk digunakan dalam *High Performance Concrete* (HPC).

Selain lolos uji laboratorium, pertimbangan strategis lain yang mendukung pemanfaatan *fly ash* Suralaya adalah kedekatan lokasi dengan area proyek KCJB, yang memberikan keuntungan dalam hal efisiensi logistik dan pengendalian biaya pengiriman. Ditambah lagi, pasokan dari PLTU Suralaya dinilai mampu memenuhi volume kebutuhan material dalam jumlah besar, sehingga menjadikannya sumber *fly ash* yang andal, konsisten, dan berkelanjutan sepanjang masa konstruksi proyek.

Pada peraturan TB 3275-2011 tentang *Concrete for Railway Engineering* telah mensyaratkan standar *fly ash* yang dapat digunakan untuk campuran beton pada Proyek KCJB. Berikut adalah standar persyaratan untuk material *fly ash* berdasarkan standar *China Codes* dan SNI:

Tabel 1. Persyaratan material *fly ash* berdasarkan standar *China Codes* dan SNI

No	Parameter Pengujian	Standar Pengujian				
		China Codes		SNI		
		Tipe I	Tipe II	Tipe F	Tipe C	Tipe N
1	Fineness (%)	≤12	≤30	≤34	≤34	≤34
2	Water Demand Ratio (%)	≤95	≤105	≤105	≤105	≤105
3	Ignition Loss (%)	≤5	≤8	≤6	≤6	≤10
4	Cl- Content (%)	≤0,02		-	-	-
5	Water Content (%)	≤1,0		≤3	≤3	≤3
6	SO_3	≤3,0		≤5	≤5	≤4
7	CaO Content (%)	≤10		-	-	-
8	Content of Free CaO (%)	≤1,0		-	-	-
9	Density (g/cm3)	≤2,6		≤5	≤5	≤5
10	Activity Index 28d (%)	≥70		≥75	≥75	≥75
11	SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 Content (%)	≥70		≥70	≥50	

Sumber: (TB 3275, 2011; SNI 2014, 2015)

Berdasarkan tabel di atas, perbedaan utama dalam klasifikasi tipe *fly ash* antara standar *China Codes* dan SNI (Standar Nasional Indonesia) terletak pada parameter dasar yang dijadikan acuan. Pada standar *China Codes*, klasifikasi *fly ash* (Tipe I dan Tipe II) terutama dibedakan berdasarkan tingkat kehalusan partikel (*fineness*), di mana Tipe I memiliki partikel lebih halus (≤12%) dibandingkan Tipe II (≤30%). Kehalusan ini sangat memengaruhi reaktivitas dan performa beton jangka panjang, terutama dalam campuran *High Performance Concrete* (HPC).

Sebaliknya, dalam standar SNI, penentuan jenis *fly ash* (Tipe F, C, dan N) lebih menitikberatkan pada komposisi kimia, khususnya kandungan gabungan SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, serta batas maksimum SO_3 *content*. Kandungan senyawa tersebut mencerminkan potensi *pozzolan* dan reaktivitas kimia dari *fly ash* yang digunakan.

Pendekatan ini mencerminkan perbedaan filosofis: standar China lebih fokus pada karakteristik fisik dan performa mekanis, sementara SNI mengutamakan komposisi kimiawi dan kestabilan unsur sebagai dasar klasifikasi.

Dari berbagai parameter pengujian *fly ash*, pengujian kehalusan partikel *(Fineness)* merupakan salah satu aspek krusial yang menjadi dasar dalam menentukan kelayakan material untuk aplikasi beton, khususnya *High Performance Concrete* (HPC). Uji *Fineness* bertujuan untuk menilai tingkat kehalusan butiran *fly ash* dengan menggunakan metode penyaringan, di mana hasilnya dinyatakan dalam persentase residu yang tertahan pada saringan standar.

Semakin rendah nilai *Fineness* (%), semakin halus butiran fly ash tersebut. *Fly ash* dengan tingkat kehalusan tinggi memiliki luas permukaan yang lebih besar, sehingga meningkatkan reaktivitas *pozzolan* dan berdampak positif terhadap kekuatan tekan dan densitas beton. Sebaliknya, nilai *Fineness* yang tinggi mengindikasikan butiran kasar, yang berpotensi menurunkan performa mekanis beton, termasuk kekuatan tekan dan ketahanan jangka panjang.

Pengujian *Fineness* ini umumnya dilakukan menggunakan alat *Digital Cement Negative Pressure Sieve Fineness Test Apparatus*, yang dirancang untuk menyaring partikel dengan tekanan negatif secara konsisten dan akurat. Hasil dari pengujian ini menjadi acuan penting dalam proses seleksi dan evaluasi kualitas *fly ash*, terutama dalam proyek-proyek infrastruktur berskala besar yang menuntut standar beton berkinerja tinggi.

Agar pemanfaatan *fly ash* dapat diterapkan secara lebih luas, masif, dan konsisten di seluruh wilayah Indonesia, maka diperlukan pengujian yang lebih komprehensif dan intensif terhadap *fly ash* yang dihasilkan oleh setiap PLTU, baik yang dikelola oleh PLN maupun oleh pihak swasta.

Langkah ini penting untuk memastikan bahwa setiap sumber *fly ash* telah memenuhi standar teknis dan spesifikasi kualitas yang dipersyaratkan, baik dari segi fisik, kimia, maupun performa aplikatifnya dalam beton. Dengan adanya verifikasi kualitas secara menyeluruh, maka *fly ash* dari berbagai wilayah dapat diintegrasikan ke dalam rantai pasok industri konstruksi nasional secara efektif, aman, dan berkelanjutan, sekaligus mendukung kebijakan pembangunan hijau dan *circular economy* di sektor infrastruktur.

Agregat Halus

Agregat halus merupakan salah satu komponen kunci dalam produksi *High Performance Concrete* (HPC) karena secara signifikan mempengaruhi kinerja mekanis dan durabilitas beton. Agregat halus didefinisikan sebagai material berbutir halus dengan ukuran maksimum ≤ 5,0 mm, di mana pasir alami atau buatan menjadi jenis yang paling umum digunakan.

Dalam campuran beton, *agregat* halus memiliki fungsi strategis, antara lain meningkatkan kemudahan pengerjaan (*workability*), memperkuat struktur, dan menunjang daya tahan (*durability*) terhadap pengaruh lingkungan. Oleh karena itu, *agregat* ini harus memenuhi sejumlah karakteristik teknis penting, seperti:

- Gradasi: mempengaruhi aliran dan kepadatan beton segar.
- Kadar air: berdampak pada rasio air-semen yang mempengaruhi kekuatan akhir.
- Kandungan lumpur atau partikel halus: dapat menurunkan kekuatan dan daya rekat.
- Kebersihan: berpengaruh langsung pada performa jangka panjang beton.
- Kekerasan butiran: memengaruhi ketahanan beton terhadap beban dan abrasi.

- Kepadatan (berat jenis): menentukan massa jenis campuran beton.

Secara umum, *agregat* halus yang baik harus memiliki permukaan tajam dan keras, bersifat tahan lama, rendah kandungan senyawa organik, bersih dari kotoran, dan memiliki distribusi ukuran butir (gradasi) yang seragam. Pemenuhan spesifikasi tersebut menjadi krusial dalam menjamin kinerja optimal beton HPC, baik dari aspek kekuatan struktural maupun umur layan jangka panjang.

Agregat halus (pasir) yang digunakan sebagai material utama dalam campuran beton untuk Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB) wajib memenuhi ketentuan teknis yang diatur dalam standar Tiongkok TB 3275-2011: *Concrete for Railway Engineering*. Standar ini menetapkan bahwa pasir yang digunakan harus berasal dari sumber sungai (*natural river sand*) atau pasir buatan *(artificial sand)* yang diproduksi melalui unit produksi dengan proses pengolahan khusus untuk menjamin kualitas dan konsistensinya.

Ketentuan tersebut secara eksplisit melarang penggunaan pasir dari sumber lain seperti pasir laut, pasir gunung, atau pasir bukit, karena jenis pasir tersebut umumnya tidak memenuhi karakteristik teknis yang disyaratkan, seperti gradasi, kebersihan, kekerasan, serta kadar kandungan garam atau mineral yang dapat mengganggu kualitas beton.

Standar Tiongkok ini menekankan pentingnya *agregat* halus dengan kualitas tinggi dan konsistensi yang ketat, mengingat beton yang digunakan harus mampu bertahan dalam kondisi operasional yang berat dan memiliki umur layan panjang. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas, berikut ini disajikan perbandingan standar teknis *agregat* halus antara standar Tiongkok TB 3275-2011 dan standar nasional Indonesia (SNI) sebagai referensi teknis dan evaluatif.

Tabel 2. Persyaratan Material Agregat Halus Berdasarkan Standar Tiongkok dan SNI

No	Parameter Uji		Standar Uji			
			TB 3275-2011			SNI
			≤C30	C30-45	≥C50	SNI 03-1970-1990
1	Apparent density (kg/m^3)			**≥2.500**		-
2	Saturated Surface Dry Density			-		**≥2.500**
3	Kadar Lumpur V/V (<#200/0,075mm) (%)			-		**≤5,0**
4	Berat Volume (rata-rata) (kg/m^3)			-		**≥1.300**
5	Compact density (kg/m^3)			**≥1.400**		-
6	Compact voidage (%)			**≥44**		-
7	Clay content (<0,075mm) (%)		**≤3,0**	**≤2,5**	**≤2,0**	-
8	Mud content (<0,6mm) (%)			**≤0,5**		-
9	Mica content (<0,075mm) (%)			**≤0,5**		-
10	Soundness (%)			**≤8**		-
11	Cl content (%)			**≤0.02**		-
12	Water absorption (%)			**≤2**		**≤5,0**
13	Content of sulfide and sulfate (%)			**≤0,5**		-
14	Organic content (%)		Lighter than standard			Maksimal skala 4
15	Lightweight particle content (%)			**≤0,5**		-
16	Crush index (artificial sand) (%)			**≤25**		-
17	Crushed dust content (artificial sand) (%)	MB < 1,40	**≤10,0**	**≤7,0**	**≤5,0**	-
		MB ≥ 1,40	**≤5,0**	**≤3,0**	**≤2,0**	
18	Fineness modulus		Persentase per ayakan			2,15-3,45
19	Alkali reactivity (%)			≤0,1		-

Dari hasil studi terhadap parameter pengujian *agregat* halus (pasir) untuk kebutuhan *High Performance Concrete* (HPC), dapat disimpulkan bahwa standar beton Tiongkok (TB 3275-2011) mencakup parameter teknis yang lebih komprehensif dibandingkan dengan standar nasional Indonesia (SNI 03-1970-1990) yang digunakan untuk beton konvensional.

Perlu dicermati bahwa meskipun beberapa parameter pengujian terlihat serupa, terdapat perbedaan pendekatan pengujian antara kedua standar. Misalnya, pengujian *density* pada TB 3275-2011 menggunakan kondisi *Apparent*, sedangkan SNI mengacu pada kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD). Selain itu, pada parameter kadar lumpur, standar Tiongkok memberikan batasan nilai yang berbeda tergantung pada mutu beton (misalnya:

≤3,0% untuk C≤30 dan ≤2,0% untuk C≥50), sementara SNI menetapkan nilai tunggal yaitu ≤5,0% tanpa memperhitungkan mutu beton.

Standar Tiongkok juga membedakan secara spesifik antara *clay content* (<0,075 mm) dan *mud content* (<0,6 mm). *Clay content* menunjukkan partikel sangat halus atau material asing mikroskopis yang bisa mengganggu ikatan pasta semen, sedangkan *mud content* lebih merujuk pada material halus yang menyelimuti agregat, yang dapat menghambat ikatan antara pasta semen dan agregat.

Beberapa kandungan kimia pengotor dalam agregat halus juga perlu diawasi ketat karena berdampak langsung terhadap kekuatan dan ketahanan jangka panjang beton, antara lain:

1. Ion Klorida (Cl^-)
   Dapat menyebabkan korosi pada baja tulangan, menurunkan durabilitas, meningkatkan permeabilitas, serta memicu biaya pemeliharaan yang tinggi.
2. Ion Sulfat (SO_4^{2-})
   Menimbulkan serangan sulfat, yang berdampak pada retak struktural, pemuaian, serta penurunan kekuatan dan umur beton.
3. Mika
   Mengurangi *workability* beton segar, meningkatkan kebutuhan air, serta menurunkan kekuatan dan kualitas akhir permukaan beton.
4. Reaksi Alkali-Silika (ASR)
   Silika reaktif dalam agregat dapat bereaksi dengan alkali semen, menyebabkan pemuaian, retak internal, dan kerusakan struktural jangka panjang.

Dengan demikian, standar Tiongkok menawarkan pendekatan yang lebih presisi dan ketat, menjadikannya sangat relevan untuk proyek infrastruktur strategis berskala besar seperti KCJB, yang menuntut kualitas beton unggul dan umur layanan tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penggunaan beton *High Performance Concrete* (HPC) pada Proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB) mencapai lebih dari 8 juta m³, mencakup berbagai kelas mutu mulai dari C15 hingga C65, termasuk mutu C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C60, dan C65. Untuk kelas mutu beton di bawah C50, digunakan *fly ash* tipe II dengan kadar pemakaian lebih dari 30%, sementara untuk beton dengan mutu di atas C50, digunakan *fly ash* tipe I dalam kisaran 10–15%. Strategi pemanfaatan *fly ash* pada skala besar di proyek KCJB ini diharapkan tidak hanya menjadi contoh praktik terbaik dalam rekayasa material konstruksi, tetapi juga mampu membuka wawasan para *engineer* Indonesia terhadap potensi besar *fly ash* sebagai material ramah lingkungan. Keberhasilan ini diharapkan menjadi katalis bagi adopsi *fly ash* secara masif dalam industri konstruksi nasional.

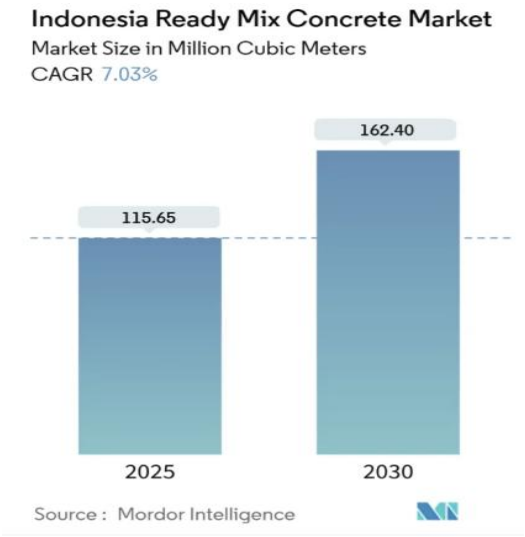
PLN Group saat ini mengoperasikan sekitar 47 lokasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan total kapasitas terpasang mencapai 18 gigawatt (GW). Dari operasional tersebut, setiap tahunnya dihasilkan rata-rata sekitar 3 juta ton limbah *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) (Antara News, 2024). Secara umum, komposisi limbah FABA yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara terdiri atas sekitar 80% hingga 90% *Fly Ash*, sedangkan sisanya, yakni sekitar 10% hingga 20%, berupa *Bottom Ash* (Soelarso & Hidayat, 2015).

Seiring dengan diberlakukannya Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, yang menyatakan bahwa FABA tidak lagi termasuk kategori limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), peluang pemanfaatannya semakin terbuka lebar. Kini, FABA dapat digunakan sebagai bahan baku alternatif bernilai tambah, terutama dalam sektor konstruksi dan infrastruktur, seperti sebagai material campuran beton, bahan urug, serta komponen dalam produksi paving block dan batako.

PT PLN (Persero) terus menunjukkan komitmen kuat dalam mengoptimalkan pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA), yaitu residu pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), sebagai bahan baku alternatif dalam berbagai proyek infrastruktur yang bermanfaat bagi masyarakat. Sepanjang tahun 2024, PLN berhasil memanfaatkan total 3,4 juta ton FABA yang berasal dari operasional 47 PLTU di seluruh Indonesia. Pemanfaatan ini tersebar pada enam sektor utama, dengan rincian: 1,73 juta ton (50,84%) digunakan sebagai lapisan pengeras jalan, 1,24 juta ton (36,24%) sebagai substitusi semen dalam campuran konstruksi, 227,5 ribu ton (8,13%) sebagai bahan baku

beton, serta 92,4 ribu ton (2,71%) untuk produk beton pracetak seperti paving block, batako, kansteen, U-ditch, dan tetrapod. Selain itu, sekitar 49,6 ribu ton (1,46%) digunakan sebagai material Non Acid Forming untuk keperluan reklamasi atau penataan lahan, dan sebanyak 8 ribu ton (0,24%) dimanfaatkan sebagai pembenah tanah yang ramah lingkungan (PLN, 2025).

Pembangunan infrastruktur nasional terus menjadi katalis positif bagi pertumbuhan industri konstruksi, khususnya dalam mendorong peningkatan permintaan terhadap semen sebagai salah satu bahan baku utama. Seiring dengan masifnya proyek-proyek strategis nasional seperti jalan tol, pelabuhan, bendungan, serta perumahan rakyat, kebutuhan akan semen diprediksi akan terus mengalami tren kenaikan dari tahun ke tahun. Proyeksi ini juga selaras dengan meningkatnya konsumsi beton di Indonesia sebagai turunan langsung dari kebutuhan semen yang tinggi. Untuk memahami tren tersebut secara lebih rinci, dapat merujuk pada tabel proyeksi pasar beton nasional yang menunjukkan pertumbuhan tahunan yang signifikan.



Gambar 2. Indonesia Ready Mix Concrete Market (Mordor Intelligence, 2024)

Dengan asumsi proporsi penggunaan *fly ash* sebesar 30% dari total kebutuhan semen, dan mengacu pada standar umum pemakaian semen dalam campuran beton sebesar 300 hingga 350 kg per meter kubik, maka digunakan angka rata-rata konservatif sebesar 320 kg semen per m³ beton. Artinya, dari setiap 320 kg semen yang dibutuhkan untuk 1 m³ beton, sekitar 96 kg dapat digantikan oleh *fly ash*. Substitusi ini tidak hanya berfungsi sebagai alternatif material, tetapi juga berkontribusi dalam menurunkan emisi karbon, menekan biaya produksi, serta mendukung pemanfaatan limbah industri pembakaran batu bara menjadi material konstruksi yang bernilai tambah.

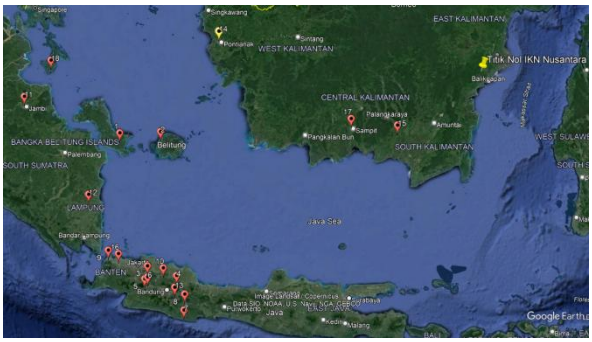
Tabel 3. Ringkasan Proyeksi Kebutuhan Fly Ash

Tahun	Volume Beton (juta m³)	Semen (juta ton)	Fly Ash (30% semen)
2025	115,65	36,996	11,10
2030	162,40	51,968	15,59

Berdasarkan tabel proyeksi di atas, terlihat bahwa kebutuhan *fly ash* untuk industri beton di Indonesia akan terus meningkat, mencapai sekitar 15,59 juta ton pada tahun 2030. Sementara itu, PLN melalui unit-unit PLTU-nya menghasilkan sekitar 3,4 juta ton *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) per tahun. Jika seluruh volume FABA ini dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai bahan substitusi semen dalam campuran beton, maka tidak hanya akan mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku konvensional, tetapi juga menghasilkan nilai ekonomi yang lebih tinggi dari limbah industri pembakaran batu bara. Pemanfaatan FABA secara maksimal akan memberikan kontribusi signifikan terhadap pembangunan berkelanjutan, mendorong *circular economy*, serta memperkuat posisi Indonesia dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan.

Pengujian terhadap *agregat* halus dalam proyek Kereta Cepat Jakarta Bandung mengacu pada standar nasional Tiongkok GB/T 14684 (2011 yang menetapkan spesifikasi teknis untuk pasir konstruksi (*Sand for Construction*).. Mengingat volume kebutuhan pasir yang sangat besar dalam pelaksanaan proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB), dilakukan proses evaluasi kualitas secara menyeluruh terhadap berbagai sumber pasir (*quarry*) dari sejumlah wilayah di Indonesia, termasuk Bangka Belitung, Pulau Sumatera, Pulau Jawa, dan Pulau Kalimantan. Untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi standar teknis dan spesifikasi proyek, setiap sampel pasir yang diterima wajib melalui tahapan *full test* di *laboratorium central* WIKA. Selain itu, dilakukan survei langsung ke lokasi *quarry* untuk menilai kondisi aktual material di lapangan, mengevaluasi ketersediaan cadangan material, kapasitas produksi dan distribusi dari pihak vendor, serta memperhitungkan jarak logistik antara lokasi *quarry* dengan *batching plant*. Pendekatan ini tidak hanya menjamin kesesuaian mutu, namun juga memastikan efisiensi pasokan material selama masa konstruksi.

Lokasi dari sampel *agregat* halus yang telah diuji sebagai berikut:



Gambar 2. Citra Satelit Lokasi Sampel *Agregat* Halus

Berdasarkan hasil serangkaian pengujian laboratorium dan survei lapangan yang telah dilakukan terhadap berbagai sumber pasir dari seluruh Indonesia, disimpulkan bahwa hanya pasir yang berasal dari Sungai Kapuas, tepatnya di wilayah Tayan – Pontianak, Kalimantan Barat, yang memenuhi seluruh persyaratan teknis dan kualitas sebagaimana ditetapkan dalam spesifikasi beton High Performance Concrete (HPC) untuk Proyek Kereta Cepat Jakarta–Bandung (KCJB). Pasir dari lokasi ini memiliki karakteristik gradasi, kadar lumpur, kekerasan, dan kandungan mineral yang sesuai dengan standar mutu yang dibutuhkan, sehingga dipilih sebagai sumber utama agregat halus dalam pembuatan beton berkinerja tinggi untuk proyek strategis tersebut (Irawan, 2020). Untuk mengurangi ketergantungan terhadap pasir dari Tayan yang memiliki keterbatasan volume pasokan, diperlukan upaya riset dan eksplorasi lanjutan terhadap quarry-quarry potensial lainnya di berbagai wilayah Indonesia.

Karakteristik fisik dan kimia sesuai dengan standar kualitas beton High Performance Concrete (HPC), seperti yang ditetapkan dalam standar Tiongkok GB/T 14684-2022 (Chinese Standard, 2022). Selain itu, perlu dilakukan evaluasi ulang terhadap sumber-sumber agregat halus yang sebelumnya pernah diuji namun belum lolos seleksi, guna melihat potensi perbaikan atau penyesuaian metode pemrosesan material (Aprizon & Pramudiyanto, 2008). Tinjauan kembali terhadap standar internasional juga menjadi hal yang esensial agar regulasi tersebut dapat dikontekstualisasikan dengan karakteristik khas sumber daya alam lokal Indonesia tanpa mengorbankan performa dan mutu beton HPC yang dihasilkan. Pendekatan ini akan memperluas fleksibilitas suplai agregat dan meningkatkan keberlanjutan rantai pasok konstruksi nasional.

KESIMPULAN

Penggunaan *fly ash* dalam proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB) menjadi tonggak penting dalam mendorong pemanfaatan limbah pembakaran batu bara sebagai material konstruksi bernilai tambah. Inisiatif ini diharapkan mampu membuka wawasan para *engineer* di Indonesia serta mempercepat adopsi *fly ash* secara luas di sektor konstruksi nasional. Sejalan dengan diterbitkannya Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 yang menghapus status FABA sebagai limbah B3, maka seluruh hasil FABA dari PLTU milik PLN

kini dapat secara legal dan teknis dimanfaatkan sebagai substitusi semen dalam pembuatan beton.

Dari hasil uji teknis terhadap berbagai sumber *agregat halus* untuk beton *High Performance Concrete* (HPC) di proyek KCJB, hanya pasir dari Tayan, Kalimantan Barat yang terbukti memenuhi spesifikasi mutu sebagaimana tercantum dalam standar TB 3275-2011 (*Concrete for Railway Engineering*).

REKOMENDASI

Untuk menjamin keberlanjutan pasokan material, diperlukan evaluasi menyeluruh terhadap sumber-sumber *agregat* halus lainnya yang sebelumnya telah diuji namun belum memenuhi syarat, serta eksplorasi terhadap *quarry* baru di berbagai wilayah Indonesia. Selain itu, perlu dilakukan peninjauan ulang terhadap standar Tiongkok yang digunakan, agar dapat disesuaikan dengan karakteristik lokal sumber daya alam Indonesia tanpa mengorbankan kualitas beton HPC yang dihasilkan. Pendekatan ini diharapkan dapat memperluas ketersediaan material, meningkatkan efisiensi rantai pasok, serta memperkuat kemandirian sektor konstruksi nasional dengan tetap menjaga standar mutu internasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Marga Lingkar Jakarta (MLJ) yang telah membantu dalam pelaksanaan pengambilan data penerangan Interchange Jalan Tol Ruas Lingkar Luar Jakarta W2 Utara Seksi 1.

DAFTAR PUSTAKA

Aitchin, P. C. (2003). The durability characteristics of high performance concrete. Cement and Concrete Composites, 25, 409–420.

Antara News. (2023, Desember 20). Pemanfaatan FABA dari sisa pembakaran PLTU PLN menjadi bahan baku pembangunan bernilai ekonomis. https://sumbar.antaranews.com/berita/570477/pemanfaatan-faba-dari-sisa-pembakaran-pltu-pln-menjadi-bahan-baku-pembangunan-bernilai-ekonomis

Aprizon, A., & Pramudiyanto, D. (2008). Pemanfaatan pasir Merapi untuk beton mutu tinggi. Jurnal Jalan dan Jembatan, 7(2), 161–170. https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/161

Chinese Standard. (2022). Sand for construction (GB/T 14684-2022). https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GBT14684-2022

Darwis, Z. S., & Hidayat, H. (2015). Pemanfaatan limbah bottom ash sebagai substitusi agregat halus dalam pembuatan beton. Jurnal Fondasi, 4(1), 52–57.

Ghozali, K. E., Yonathan, A., Antoni, A., & Hardjito, D. (2020). Penelitian awal pemanfaatan fly ash dan bottom ash PLTU Suralaya dalam pembuatan beton di lingkungan pantai. Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil, 9(1), 47–52. https://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-sipil/article/view/7705

Irawan, R. R. (2020). Beton kinerja tinggi: Teknologi dan aplikasi di Indonesia. Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, Kementerian PUPR. https://binamarga.pu.go.id/perpustakaan/repositori/beton-kinerja-tinggi-teknologi-dan-aplikasi-di-indonesia

JGJ 55-2011. (2011). Specification for mix proportion design of ordinary concrete.

Martin, D. J., et al. (2014). Kuat tekan beton geopolymer berbahan dasar abu terbang. Jurnal Sipil Statik, 2, 277–282.

Mira, S. (2018). Fly ash sebagai bahan pengganti semen pada beton. Seminar Nasional Sains dan Teknologi.

Mordor Intelligence. (2024). Indonesia ready-mix concrete market – Growth, trends, and forecasts (2024–2029). https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/indonesia-ready-mix-concrete-market

Pangestu, O. A., & Kurniawan, A. (2019). Pengaruh fly ash PLTU Suralaya terhadap performa beton di PT Pionirbeton Industri (Skripsi, Universitas Gadjah Mada). UGM Repository. https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/179728

Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 107 Tahun 2015 tentang Percepatan Penyelenggaraan Prasarana dan Sarana Kereta Cepat antara Jakarta dan Bandung. (2015).

PLN. (2025, Februari). Sepanjang 2024, 3,4 juta ton FABA dari PLN dimanfaatkan jadi berbagai bahan pendukung infrastruktur masyarakat. https://web.pln.co.id/cms/media/siaran-pers/2025/02/sepanjang-2024-34-juta-ton-faba-dari-pln-dimanfaatkan-jadi-berbagai-bahan-pendukung-infrastruktur-masyarakat/

SNI 03-1970-1990. (1991). Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus.

SNI 2847:2019. (2019). Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung.

TB/T 3275-2011. (2011). Concrete for railway engineering.

TJ/GW 158-2018. (2018). The tentative technical requirements of high performance concrete on bridge-tunnel and subgrade structure of Jakarta–Bandung high speed railway.