

Structured Literature Review (SLR): Evaluasi Kinerja Mekanis dan Durabilitas Beton dengan Substitusi Fly Ash

Salman Alfarizi^{1*}, Nevy Sandra²

^{1,2} Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Kota Padang.

*Email: salman.alfarizikoto14@gmail.com

Abstrak

Pemanfaatan fly ash (FA) sebagai Supplementary Cementitious Materials (SCMs) merupakan strategi penting dalam mereduksi jejak karbon industri semen sekaligus meningkatkan performa jangka panjang beton. Systematic Literature Review (SLR) ini bertujuan untuk mensintesis secara komprehensif pengaruh variasi kadar substitusi FA terhadap empat parameter esensial beton: kuat tekan, kuat tarik belah, kecepatan gelombang ultrasonik (Ultrasonic Pulse Velocity/UPV), dan penetrasi ion klorida (Rapid Chloride Penetration Test/RCPT). Melalui analisis terstruktur terhadap 20 artikel ilmiah eksperimental, ditemukan adanya pola dualistik kinerja: FA menurunkan kuat mekanis awal (3 sampai 7 hari) akibat efek dilusi klinker, namun FA dapat meningkatkan performa mekanis dan durabilitas pada umur lanjut (28 sampai 180 hari) melalui reaksi pozzolanik sekunder. Kadar optimum FA diidentifikasi berada pada rentang 14% hingga 30% untuk aplikasi beton mutu sedang dan tinggi, sedangkan penggunaan sistem pengikat ternier kombinasi FA dan silica fume terbukti efektif menutupi defisiensi mekanis awal. Pengukuran non-destruktif UPV menunjukkan korelasi linear positif terhadap pertumbuhan kuat tekan, sementara uji RCPT mengonfirmasi bahwa struktur mikro yang dipadatkan oleh gel C-S-H sekunder mampu menurunkan permeabilitas muatan listrik klorida hingga kategori very low (<1000 Coulomb). Tinjauan ini menyimpulkan bahwa standarisasi parameter pengujian terintegrasi sangat penting untuk menjamin aspek struktural dan durabilitas beton ramah lingkungan di lingkungan agresif.

Kata Kunci: Fly Ash (FA), Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), Rapid Chloride Penetration Test (RCPT).

Pernyataan Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima hibah khusus dari lembaga pendanaan mana pun di sektor publik, komersial, maupun nirlaba.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses penyusunan penelitian ini. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan baik secara akademik maupun teknis sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Etika Publikasi

Penelitian ini tidak melibatkan manusia sebagai subjek penelitian. Penulis telah memastikan bahwa seluruh sumber data dan referensi yang digunakan dalam penelitian ini dikutip dan dicantumkan secara benar sesuai dengan kaidah penulisan ilmiah yang berlaku.

Penyataan AI

Perangkat berbasis kecerdasan buatan digunakan secara terbatas untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan naskah. Seluruh isi, interpretasi, sitasi, analisis, dan kesimpulan telah diperiksa serta menjadi tanggung jawab penulis.

1. Pendahuluan

Akselerasi pembangunan infrastruktur global menempatkan beton sebagai material konstruksi yang paling besar dikonsumsi di bumi. Konsekuensinya, produksi Semen Portland Komersial yang menjadi bahan pengikat utama memicu pelepasan gas karbon dioksida (CO_2) dalam volume yang sangat besar, membebani target dekarbonisasi global. Di sisi lain, pembakaran batu bara pada sektor energi menghasilkan limbah padat berupa *fly ash* (FA) yang melimpah dan dikategorikan sebagai material yang menuntut pengelolaan ekologis yang serius agar tidak mencemari biosfer (Ulva, 2023; Umboh et al., 2014).

Dalam rekayasa material teknik sipil, integrasi FA sebagai material substitusi parsial semen menjadi solusi dual-konteks: mereduksi limbah industri dan menekan konsumsi semen murni (Maryoto, 2008; Espinosa et al., 2023). Partikel FA yang bersifat pozzolanik kaya akan kandungan senyawa silika amorf (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3). Senyawa-senyawa aktif tersebut akan bereaksi dengan produk sampingan hidrasi semen, yaitu kalsium hidroksida [$Ca(OH)_2$], untuk menghasilkan kalsium silikat hidrat (gel C-S-H) sekunder yang berfungsi sebagai pengisi pori kapiler beton, (Sandra et al., 2026).

Meskipun potensi dasarnya telah banyak diteliti, terdapat variabilitas yang signifikan terkait kinerja mekanis dan aspek durabilitas dari beton berbasis FA ini. Beberapa studi melaporkan penurunan kapasitas beban struktural pada umur awal, sementara studi lainnya berfokus pada ketahanan lingkungan agresif jangka panjang. Guna menjembatani perbedaan hasil tersebut, diperlukan sebuah evaluasi komprehensif yang berfokus pada empat parameter utama: indikator mekanis berupa Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah, indikator kepadatan homogenitas menggunakan metode non-destruktif UPV, serta indikator ketahanan penetrasi kimiawi melalui metode RCPT. Melalui studi SLR ini, korelasi ilmiah antar-keempat variabel tersebut akan disintesis secara logis untuk memberikan pedoman standardisasi aplikasi beton hijau di lapangan.

2. Metodologi Tinjauan Literatur

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Tinjauan Literatur Sistematis *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi secara kritis, dan mengintegrasikan data eksperimental mengenai pemanfaatan *fly ash* pada campuran beton. Prosedur SLR ini diadopsi untuk memastikan bahwa proses pengumpulan data berjalan secara objektif, terstruktur, dan dapat direplikasi oleh peneliti lain.

2.2 Strategi Pencarian Literatur

Penelusuran artikel ilmiah dilakukan secara digital memanfaatkan pangkalan data bereputasi nasional dan internasional, termasuk *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *MDPI*, dan *Springer Link*. Rentang tahun publikasi jurnal yang ditinjau dibatasi pada kurun waktu 18 tahun terakhir, yaitu dari tahun 2008 sampai dengan 2026, guna menangkap perkembangan penelitian serta pembaruan standar teknologi beton hijau. Publikasi dibatasi pada artikel ilmiah formal yang menggunakan kata kunci (*search strings*)

terstruktur: *Fly ash; Compressive Strength; Split Tensile; Ultrasonic Pulse Velocity; Chloride Penetration*.

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Proses seleksi literatur dalam peninjauan ini didasarkan pada kriteria inklusi dan eksklusi yang ketat untuk menjaga relevansi serta kualitas data yang dianalisis. Kriteria inklusi menetapkan bahwa artikel yang dipilih harus berupa jurnal penelitian asli (*peer-reviewed research articles*) yang menyajikan data eksperimental kuantitatif mengenai pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, nilai UPV, atau nilai RCPT pada beton atau mortar semen dengan campuran *fly ash* (FA), serta menggunakan metode pengujian berbasis standar baku seperti SNI, ASTM, atau EN. Sebaliknya, kriteria eksklusi diterapkan untuk mengeliminasi dokumen yang berupa buku teks komersial, laporan skripsi atau tesis yang tidak dipublikasikan secara umum, artikel opini, penelitian mengenai beton geopolimer murni tanpa penggunaan semen portland sama sekali, serta artikel yang tidak menyajikan data pengujian mikrostruktur secara lengkap.

2.4 Proses Seleksi Literatur

Dari hasil pencarian awal, artikel disaring secara berjenjang. Tahap pertama melibatkan eliminasi duplikasi naskah. Tahap kedua mencakup skrining judul dan abstrak untuk memastikan fokus material berada pada beton dengan *Supplementary Cementitious Materials* (SCMs) berupa abu terbang. Tahap ketiga berupa analisis teks lengkap (*full text review*) untuk memastikan keberadaan minimal dua dari empat parameter utama (Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, UPV, RCPT). Berdasarkan penyaringan ketat tersebut, terpilih 20 referensi ilmiah utama sebagai basis sintesis literatur.

2.5 Teknik Analisis Data

Data dari setiap artikel yang terpilih diekstraksi dan disusun dalam bentuk matriks literatur yang memuat informasi mengenai penulis, tahun publikasi, metode penelitian, variabel yang diteliti, serta hasil utama penelitian. Selanjutnya dilakukan analisis deskriptif-komparatif dengan membandingkan temuan dari berbagai penelitian untuk mengidentifikasi pola, persamaan, perbedaan, dan kecenderungan hasil penelitian terkait kuantitatif yang meliputi persentase substitusi FA, nilai kuat tekan (MPa), kuat tarik belah (MPa), kecepatan ultrasonik UPV (km/s), dan muatan listrik RCPT (Coulomb) diekstraksi ke dalam matriks tabulasi komparatif. Analisis data dilakukan dengan pendekatan deskriptif analitis berbasis mekanisme kimia-fisika material beton untuk menarik korelasi fungsional antar-variabel secara logis dan benar.

3. Sintesis Literatur dan Pembahasan

3.1 Karakteristik *Fly Ash* Sebagai Pengikat Tambahan

Sebagai material pengikat tambahan *Supplementary Cementitious Materials* (SCMs), karakteristik fisik *fly ash* (FA) sangat ditentukan oleh bentuk morfologinya yang bulat sempurna (*spherical particles*). Bentuk partikel berbentuk bola halus ini memberikan efek bantalan peluru (*ball-bearing effect*) di dalam campuran beton segar, yang secara mekanis meminimalkan gesekan antargranular agregat dan menurunkan kebutuhan air untuk mencapai konsistensi tertentu, sehingga mampu meningkatkan *workability* dan kemudahan alir beton secara signifikan (Padavala et al., 2025).

Ditinjau dari sifat kimia dan aktivitas pozzolaniknya, FA tersusun atas senyawa silika amorf dan alumina dalam jumlah besar yang membutuhkan durasi waktu tertentu untuk dapat berinteraksi secara aktif di dalam matriks pengikat (Sandra et al., 2026; Zakirullah

et al., 2024). Pada fase awal pencampuran, komponen semen portland berhidrasi terlebih dahulu dan menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) primer serta produk sampingan berupa kalsium hidroksida atau *portlandite* yang tidak memiliki nilai kekuatan struktural. Sifat aktif pozzolanik dari partikel silika dan alumina amorf pada FA baru dapat bekerja secara optimal setelah proses hidrasi awal tersebut menghasilkan akumulasi yang cukup di dalam pasta semen (Padavala et al., 2025).

Keterlambatan reaksi kimia pozzolanik sekunder ini menjadi dasar ilmiah yang rasional mengapa perilaku kekuatan mekanis beton dengan campuran FA menunjukkan karakteristik dualistik pada variasi umur pengujian yang berbeda. Pada umur awal (3 hingga 14 hari), beton mengalami defisiensi kekuatan akibat dominasi efek dilusi klinker semen murni (Hawileh et al., 2025; Setiawati, 2018). Pada umur lanjut, reaksi pozzolanik fly ash dapat meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan berkontribusi terhadap peningkatan performa mekanis serta durabilitas beton (Solikin et al., 2022).

Penurunan kuat tekan pada usia awal beton yang mengandung *fly ash* tidak semata-mata diakibatkan oleh kelambatan reaksi pozzolanik, melainkan juga oleh menurunnya proporsi klinker aktif yang berkontribusi terhadap proses hidrasi awal, mengingat sebagian klinker tersebut tergantikan oleh *fly ash* yang belum bersifat reaktif. Dengan demikian, fenomena efek dilusi (*dilution effect*) serta keterlambatan reaktivitas perlu dipisahkan secara konseptual dari efek pengisi (*filler effect*) semata. Sementara itu, pada usia yang lebih lanjut, ketersediaan Ca(OH)_2 sebagai produk hidrasi semen yang masih tersisa memberikan peluang bagi unsur silika dan alumina amorf pada fly ash untuk bereaksi lebih lanjut membentuk gel C-S-H dan C-A-S-H sekunder. Proses ini berkontribusi terhadap peningkatan kepadatan matriks beton serta perbaikan kualitas zona transisi antarmuka *Interfacial Transition Zone* (ITZ).

3.2 Analisis Sifat Mekanis: Korelasi Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton Berbasis Fly Ash

Sintesis data dari 20 jurnal eksperimental menunjukkan karakteristik pertumbuhan kekuatan beton yang sangat bergantung pada umur hidrasi dan persentase substitusi *fly ash*. Pada umur awal pengujian (3, 7, hingga 14 hari), penambahan FA secara konsisten memicu penurunan kuat tekan awal dibandingkan dengan kontrol beton normal (Zakirullah et al., 2024; Luhur & Riyanto, 2025; Setiawati, 2018). Fenomena ini terjadi akibat rendahnya laju reaksi pozzolanik pada suhu ruang dan adanya efek dilusi, di mana pengurangan proporsi semen menurunkan volume pembentukan kalsium silikat hidrat (gel C-S-H) primer pada fase awal penyerapan air, (Hawileh et al., 2025; Padavala et al., 2025).

Karakteristik mekanis tersebut mengalami lompatan performa yang sangat signifikan pada umur menengah hingga lanjut (28, 56, 90, hingga 180 hari). Komponen silika aktif dalam FA bereaksi secara lambat dengan kalsium hidroksida [Ca(OH)_2]—sebuah produk sampingan hidrasi yang rapuh—dan mengonversinya menjadi jaringan gel C-S-H/C-A-S-H sekunder yang padat.

Kadar Optimum Moderat (14% - 30%): Campuran pada rentang ini menghasilkan performa mekanis paling terbaik. Ulva (2023) menemukan nilai kuat tekan optimum tercapai pada variasi kadar 15% dengan nilai 26,7 MPa untuk beton mutu sedang. Sementara itu, Zakirullah et al. (2024) berhasil mencatatkan kekuatan maksimal mencapai 32,05 MPa di usia 28 hari pada kadar substitusi 14% untuk beton struktural. Pada pengujian beton mutu tinggi (*Ultra-High-Performance Concrete/UHPC*), (Hawileh et al., 2025) mengonfirmasi bahwa substitusi FA hingga kadar 30%-35% dengan rasio air-

pengikat (*w/b*) rendah mampu melampaui kekuatan mekanis beton kontrol pada umur 90 hari. Kehadiran partikel halus FA juga terbukti meningkatkan kuat tarik belah secara proporsional. (Saputri et al., 2023) menyatakan penambahan anyaman kawat serat bersama FA mengoptimalkan keliatan (*ductility*) beton terhadap beban tarik bebas, sedangkan (Padavala et al., 2025) mencatatkan nilai kuat tarik belah hingga 6,3 MPa pada umur 180 hari dengan formulasi optimum.

Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian Sandra et al. (2026), yang mengindikasikan bahwa tingkat substitusi *fly ash* sebesar 15% menghasilkan kinerja optimum pada beton, ditandai dengan peningkatan kuat tekan sebesar 8–10% pada umur 90 hari apabila dibandingkan dengan beton kontrol. Di sisi lain, kadar substitusi *fly ash* yang lebih tinggi, khususnya pada level 30% dan 45%, cenderung menyebabkan penurunan kekuatan pada usia awal akibat dominasi efek dilusi serta berkurangnya derajat hidrasi semen.

Merujuk pada kajian literatur yang telah dilakukan, kadar substitusi *fly ash* yang optimum umumnya berada pada rentang rendah hingga sedang, yaitu sekitar 14% hingga 30%. Meskipun demikian, rentang tersebut tidak bersifat universal, mengingat besarnya sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kelas *fly ash* yang digunakan (Class F atau Class C), tingkat kehalusan partikel, kadar CaO dan *Loss on Ignition* (LOI), rasio air terhadap bahan pengikat, umur *curing*, mutu beton yang ditargetkan, serta penggunaan superplasticizer atau *silica fume*. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan oleh Sandra et al. (2026) menunjukkan bahwa substitusi *fly ash* sebesar 15% memberikan keseimbangan terbaik antara kuat tekan, kuat lentur, dan ketahanan terhadap korosi pada sistem yang diuji, sementara kadar substitusi yang lebih tinggi, yaitu 30% dan 45%, cenderung menurunkan performa pada usia awal.

Kadar High-Volume Fly Ash / HVFA (>40% - 70%): Ketika kadar FA ditingkatkan melampaui 40% hingga mencapai 70%, terjadi penurunan kuat tekan dan kuat tarik belah yang cukup signifikan pada umur standar 28 hari, (Umboh et al., 2014). Pada penelitian yang lain menjelaskan bahwa pada kadar semen yang terlalu sedikit, produksi $Ca(OH)_2$ awal menjadi tidak mencukupi untuk memicu reaksi pozzolanik seluruh partikel FA, sehingga sebagian besar abu terbang hanya berfungsi sebagai *filler* inert tak bereaksi. Meskipun demikian, ditinjau dari aspek manajemen biaya konstruksi, mortar dengan 50% FA menawarkan efisiensi ekonomi yang besar hingga 32% lebih rendah daripada mortar tanpa abu terbang (Janah et al., 2021), sehingga sangat layak diaplikasikan pada elemen non-struktural atau dinding modular ramah lingkungan, (Utami et al., 2023). Untuk memitigasi kelemahan mekanis awal pada beton HVFA atau SCC (*Self-Compacting Concrete*), pengembangan sistem pengikat ternier (*ternary blends*) dengan menambahkan *silica fume* (SF) berkisar 5%–10% terbukti efektif meningkatkan kekuatan mekanis awal secara drastis melalui percepatan nukleasi hidrasi.

Penggunaan *silica fume* dalam sistem ternier tersebut dapat dipandang sebagai strategi pendukung guna mempercepat pembentukan mikrostruktur yang padat pada usia awal beton *High Volume Fly Ash* (HVFA). Namun demikian, mengingat fokus utama kajian ini adalah substitusi *fly ash*, pembahasan mengenai *silica fume* dibatasi pada perannya dalam mengatasi kelemahan mekanis pada usia awal dan tidak diperluas menjadi topik tersendiri.

Meskipun penerapan HVFA berpotensi memberikan keuntungan yang signifikan baik dari aspek ekonomi maupun lingkungan, pemanfaatannya pada elemen struktural tetap perlu mempertimbangkan sejumlah aspek, antara lain penurunan kekuatan pada usia

awal, kebutuhan periode curing yang lebih panjang, serta perlunya validasi terhadap durabilitas jangka panjang. Efisiensi biaya dan kelayakan struktural pada dasarnya merupakan dua aspek yang berbeda; oleh karena itu, kadar substitusi fly ash yang tinggi lebih sesuai diterapkan pada aplikasi non-struktural atau elemen pracetak tertentu, kecuali apabila didukung oleh desain campuran khusus, seperti penerapan rasio air-pengikat yang rendah, penggunaan aktivator, maupun penerapan sistem pengikat terner.

3.3 Analisis Durabilitas Mikrostruktur: Sintesis Kepadatan Melalui Parameter UPV dan Ketahanan RCPT

Korelasi makro-mikro material beton hijau berbasis FA dapat divalidasi secara komparatif melalui parameter pengujian non-destruktif UPV dan uji permeabilitas klorida RCPT. Pengukuran nilai UPV berprinsip pada kecepatan rambat gelombang longitudinal menembus matriks beton; semakin padat dan homogen struktur internal suatu beton, semakin tinggi pula kecepatan rambat gelombang yang dihasilkan (Mehta, 2025; Karaiskos et al., 2022; Hanif et al., 2024).

Sintesis data menunjukkan bahwa beton dengan substitusi FA optimum (15%–30%) secara konsisten mencatatkan nilai UPV yang melampaui ambang batas 4,5 km/s hingga 4,75 km/s pada umur lanjut. Hasil ini mengindikasikan bahwa reaksi pozzolanik FA berhasil mentransformasi pori kapiler kasar menjadi pori gel yang jauh lebih halus dan terisolasi, sehingga mengklasifikasikan kualitas fisik beton ke dalam kategori *Excellent*. Nilai UPV ini memiliki korelasi linear positif yang kuat dengan pertumbuhan kuat tekan beton, menjadikannya parameter andalan untuk mengevaluasi keandalan struktur di lapangan tanpa melakukan pengujian destruktif.

Hubungan antara nilai UPV dan kuat tekan perlu dipahami sebagai suatu hubungan yang bersifat indikatif, bukan hubungan yang berlaku secara universal. Nilai UPV yang tinggi pada umumnya mengindikasikan matriks beton yang lebih padat dan homogen. Namun demikian, estimasi kuat tekan yang diperoleh berdasarkan nilai UPV dapat bervariasi antar-campuran, mengingat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain jenis agregat yang digunakan, kadar air internal, umur *curing*, serta distribusi pori dalam matriks beton. Oleh karena itu, model korelasi antara UPV dan kuat tekan pada beton berbahan *fly ash* sebaiknya dikalibrasi secara khusus untuk setiap sistem campuran yang digunakan.

Dampak langsung dari pemadatan mikrostruktur ini terbukti pada peningkatan drastis ketahanan durabilitas beton terhadap penetrasi ion klorida berbahaya yang sering memicu karat pada tulangan baja, (Sathe & Patil, 2023). Pada pengujian RCPT berbasis standar ASTM C1202, beton normal tanpa substitusi umumnya menunjukkan nilai muatan listrik tembus yang tinggi (>3000 Coulomb), yang menandakan porositas kapiler yang saling terhubung.

Sebaliknya, penambahan FA dengan kehalusan tinggi (lolos saringan mesh nomor 400) mampu menurunkan nilai RCPT secara signifikan hingga di bawah 1000 Coulomb, yang masuk dalam kategori penetrasi klorida *very low*. Terputusnya kontinuitas pori akibat pengisian gel C-S-H sekunder membatasi mobilitas ion klorida secara signifikan. Hal ini diperkuat oleh hasil pemantauan elektrokimia potensial sel setengah (*half-cell potential*), di mana beton dengan campuran 15% FA sukses menahan laju penurunan potensial korosi di zona aman (rentang –265 mV hingga –290 mV) di bawah paparan air garam korosif, jauh melampaui performa beton normal yang mengalami korosi aktif dengan nilai melewati –350 mV. Peningkatan resistensi durabilitas ini juga berbanding lurus dengan

penurunan koefisien penyerapan air kapiler (*sorptivity*) serta penurunan berat isi beton ringan praktis modular tanpa mengorbankan batas aman struktural bangunan (Anggarini & Hardiani, 2023).

Nilai RCPT yang rendah pada beton berbahan *fly ash* tidak hanya mengindikasikan berkurangnya konektivitas pori, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh peningkatan resistivitas listrik akibat perubahan komposisi larutan pori, mengingat pada dasarnya pengujian RCPT mengukur besaran muatan listrik yang melewati spesimen, bukan mengukur jumlah ion klorida secara langsung. Nilai RCPT turut dipengaruhi oleh sejumlah faktor lain, yaitu konduktivitas larutan pori, resistivitas beton, suhu pengujian, serta jenis bahan pengikat yang digunakan. Oleh karena itu, hasil pengujian RCPT sebaiknya tidak dijadikan sebagai satu-satunya ukuran penetrasi klorida, melainkan sebagai indikator gabungan yang mencerminkan struktur pori, konduktivitas ionik, dan resistivitas beton secara simultan.

Penurunan nilai RCPT pada beton *fly ash* berpotensi menunda inisiasi korosi, sebagai konsekuensi dari terbatasnya jalur transportasi ion klorida menuju tulangan baja. Meskipun demikian, risiko korosi pada tulangan turut dipengaruhi oleh faktor lain, yaitu resistivitas beton, ketersediaan oksigen dan kelembapan, serta kemampuan pasta semen dalam mempertahankan tingkat alkalinitas di sekitar tulangan baja. Oleh karena itu, evaluasi durabilitas beton *fly ash* sebaiknya tidak hanya didasarkan pada pengujian RCPT semata, melainkan perlu dikombinasikan dengan pengujian half-cell potential, resistivitas listrik, serta observasi mikrostruktur, sebagaimana pendekatan yang diterapkan oleh Sandra et al. (2026), yang mengintegrasikan pengujian kuat tekan, kuat lentur, *half-cell potential*, dan SEM.

3.4 Peran Mikrostruktur dan ITZ terhadap Kinerja Beton Fly Ash

Pada beton berbasis *fly ash*, peningkatan performa pada usia lanjut tidak hanya disebabkan oleh bertambahnya jumlah produk hidrasi, tetapi juga oleh perubahan pada distribusi ukuran pori serta perbaikan kualitas zona transisi antarmuka (Interfacial Transition Zone). Partikel *fly ash* yang berukuran halus berperan mengisi rongga antarbutir semen, sementara reaksi pozzolanik yang berlangsung menghasilkan gel C-S-H sekunder yang berkontribusi terhadap berkurangnya volume pori kapiler. Perubahan-perubahan tersebut menyebabkan matriks beton menjadi lebih padat, yang terlihat dari peningkatan nilai UPV, penurunan nilai RCPT, serta semakin terbatasnya jalur penetrasi ion klorida.

3.5 Hubungan Kuat Tekan, UPV, dan RCPT pada Beton Berbasis Fly Ash

Hasil eksperimen dari berbagai literatur menunjukkan adanya hubungan fungsional yang kuat antara kuat tekan beton dan parameter durabilitas struktur mikronya, yang diukur melalui UPV dan RCPT. Hubungan ketiga variabel ini dipengaruhi oleh perubahan struktur matriks semen akibat efek pengisian pori (*filler effect*) dan perkembangan reaksi pozzolanik sekunder dari *fly ash*.

Pada beton normal maupun beton dengan substitusi FA kadar optimum (14% hingga 30%), peningkatan kuat tekan berbanding lurus dengan kenaikan nilai UPV dan berbanding terbalik dengan nilai muatan listrik pada uji RCPT. Saat proses hidrasi semen berlangsung, terbentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) primer dan kalsium hidroksida $Ca(OH)_2$. Komponen silika aktif (SiO_2) di dalam FA kemudian bereaksi secara lambat dengan $Ca(OH)_2$ yang rapuh tersebut. Reaksi pozzolanik jangka panjang ini menghasilkan gel C-S-H sekunder tambahan yang menutup pori-pori kapiler berukuran besar dan mengubahnya menjadi pori-pori gel yang lebih halus serta terisolasi.

Sebaliknya, pada beton dengan kandungan *fly ash* tinggi *High-Volume Fly Ash* yang melebihi 40%, hubungan ketiga parameter ini menunjukkan tren penurunan kinerja pada umur awal. Jumlah klinker semen yang terlalu sedikit menyebabkan produksi $Ca(OH)_2$ awal tidak mencukupi untuk bereaksi dengan seluruh partikel FA. Akibatnya, matriks internal beton pada umur 7 hingga 28 hari masih memiliki porositas yang tinggi. Kondisi ini ditandai dengan nilai kuat tekan yang rendah, nilai UPV di bawah 4,0 km/s, serta nilai Coulomb yang tinggi pada uji RCPT karena jalur pori mikro masih saling terhubung (Solikin et al., 2022).

Secara keseluruhan, keselarasan data ini membuktikan bahwa pengujian non-destruktif UPV memiliki keandalan yang tinggi untuk mengestimasi kuat tekan sekaligus tingkat kekedapan dan durabilitas jangka panjang beton ramah lingkungan di lapangan. Pemanfaatan komposisi pengikat pada kadar yang tepat dapat menjamin terciptanya beton hijau yang memenuhi standar kekuatan dan ketahanan lingkungan (Deni et al., 2023).

3.6 Research Gap dan Arah Penelitian Lanjutan

Meskipun pemanfaatan *fly ash* (FA) pada beton telah diteliti secara luas, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) yang memerlukan kajian lebih mendalam, khususnya terkait penurunan kuat tekan awal pada campuran dengan volume tinggi (*High-Volume Fly Ash*). Penggunaan sistem pengikat ternier seperti kombinasi FA dan *silica fume* (SF) memang terbukti mampu memitigasi kelemahan mekanis tersebut. Namun, formulasi rasio optimum yang dapat mempercepat reaksi pozzolanik awal tanpa mengurangi aspek durabilitas jangka panjang masih memerlukan standarisasi yang lebih luas. Selain itu, hubungan kuantitatif antara nilai UPV dan kuat tekan nyata beton berbasis FA belum memiliki formula universal. Variabel seperti jenis agregat dan kadar air sangat memengaruhi hasil pembacaan UPV, sehingga pengembangan model prediksi berbasis matematis atau pembelajaran mesin (*machine learning*) yang lebih presisi menjadi kebutuhan penting pada penelitian mendatang.

Di sisi lain, pengujian durabilitas melalui parameter RCPT dalam literatur saat ini mayoritas masih berbasis pada simulasi laboratorium berskala cepat. Kajian empiris yang memantau performa beton berbasis FA terhadap paparan lingkungan maritim dan sulfat ekstrem secara langsung di lapangan dalam jangka panjang masih sangat terbatas. Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada validasi usia pakai (*service life*) struktur untuk membuktikan apakah nilai RCPT yang rendah (<1000 Coulomb) di laboratorium linier dengan ketahanan jangka panjang di lingkungan nyata. Pemantauan ini juga harus didukung oleh karakterisasi mikrostruktur yang lebih detail pada area *Interfacial Transition Zone* guna memahami mekanisme pembentukan gel C-S-H sekunder di zona kritis tersebut secara komprehensif.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil pengujian, pemanfaatan *fly ash* (FA) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa jangka panjang beton melalui reaksi pozzolanik sekunder yang lambat, yang mampu mengonversi senyawa kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) menjadi gel C-S-H tambahan guna memperkuat matriks beton pada umur lanjut 28 hingga 180 hari. Untuk menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah tertinggi, rentang persentase substitusi FA optimum berada pada angka 14% hingga 30%, dengan pencapaian kuat tekan optimum sebesar 32,05 MPa pada umur 28 hari. Sebaliknya,

tingkat substitusi di atas 40% (*High-Volume Fly Ash*) cenderung menurunkan kekuatan mekanis pada umur awal akibat efek dilusi, meskipun di sisi lain mampu menawarkan efisiensi biaya produksi hingga 32%.

Kepadatan struktur internal beton dengan kadar FA optimum ini tercermin secara akurat melalui pengukuran non-destruktif UPV yang secara konsisten menunjukkan nilai di atas 4,5 km/s (kategori *Excellent*), serta memiliki korelasi linear positif terhadap kenaikan kuat tekan nyata beton struktural. Selaras dengan tingkat kepadatan fisik tersebut, pengujian RCPT mengonfirmasi bahwa kandungan FA mampu menekan tingkat permeabilitas muatan listrik klorida hingga kategori sangat rendah (*very low* < 1000 Coulomb). Karakteristik mikrostruktur yang rapat dan kedap ini berkontribusi langsung dalam memitigasi risiko korosi pada baja tulangan sekaligus memperpanjang usia pakai (*service life*) infrastruktur beton yang dibangun di lingkungan agresif seperti kawasan maritim.

Perlu ditegaskan bahwa seluruh angka dan rentang nilai yang dipaparkan tersebut merupakan hasil sintesis dari literatur yang dikaji dan tidak bersifat mutlak untuk diterapkan pada seluruh kondisi. Kadar substitusi *fly ash* yang optimum, nilai UPV, serta nilai RCPT, pada praktiknya sangat bergantung pada karakteristik *fly ash* yang digunakan, metode *curing* yang diterapkan, rasio air terhadap bahan pengikat, serta kondisi paparan lingkungan di lapangan. Oleh karena itu, penerapan hasil tinjauan ini pada proyek konstruksi tertentu tetap memerlukan verifikasi eksperimental terhadap material dan kondisi setempat yang bersangkutan.

Referensi

- Anggarini, E., & Hardiani, D. (2023). Pengaruh Penambahan Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Normal 30 Mpa. *Jurnal Kacapuri: Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 5(2), 470. <https://doi.org/10.31602/Jk.V5i2.9094>
- Deni, D. P., Alfianarrochmah, 'Ilma, & Kurnianingsih, O. (2023). Penetrasi Dan Sorptivitas Klorida Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Substitusi Metakaolin. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 8(02), 115–126. <https://doi.org/10.29244/Jsil.8.02.115-126>
- Espinosa, A. B., Revilla-Cuesta, V., Skaf, M., Faleschini, F., & Ortega-López, V. (2023). Utility Of Ultrasonic Pulse Velocity for Estimating the Overall Mechanical Behavior of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/App13020874>
- Hanif, A., Kurniawandy, A., & Yusa, M. (2024). Evaluasi Kuat Tekan Beton Menggunakan UPV Dan Hammer Test. 12(1). <https://doi.org/10.35583/Js.V12i1.247>
- 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. In *International Journal of Concrete Structures and Materials* (Vol. 19, Number 1). Springer Nature Korea. <https://doi.org/10.1186/S40069-024-00757-X>

- Janah, I., Habsya, C., & Sri Agustin, R. (2021). *PEMANFAATAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN PADA SEGMENT KOLOM STRUKTUR MODULAR BETON RAMAH LINGKUNGAN*. 7(1), 9–14.
- Karaiskos, G., Deraemaeker, A., Aggelis, D. G., & Van Hemelrijck, D. (2022). *Monitoring Of Concrete Structures Using the Ultrasonic Pulse Velocity Method*.
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/11/113001>
- Luhur, Y. P., & Riyanto, S. (2025). *PENGARUH KADAR FIBER POLYPROPYLENE DAN SUBSTITUSI FLY ASH TERHADAP KUAT TEKAN DAN KUAT TARIK BETON* (Vol. 6).
<http://jurnal.polinema.ac.id/>
- Maryoto, A. (2008). *Pengaruh Penggunaan High Volume Fly Ash Pada Kuat Tekan Mortar*.
<https://doi.org/10.15294/jtsp.v10i2.6951>
- Mehta, P. K. (2025). *HIGH-PERFORMANCE, HIGH-VOLUME FLY ASH CONCRETE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT*.
- Padavala, S. S. A. B., Avudaiappan, S., Paluri, Y., Bharath, C. N., Prathipati, S. R. R. T., & Kumara, A. M. (2025). Self-Compacting Concrete with Fly Ash and Silica Fume: Experimental Evaluation, Microstructural Analysis, And Machine Learning Modeling. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33180-7>
- Sandra, N., Damanik, N., Caronge, M. A., & Soleh, M. (2026). Mechanical Performance and Corrosion Resistance of Concrete with Partial Fly Ash Substitution. *Journal Of Building Pathology and Rehabilitation*, 11(2). <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00765-8>
- Saputri, Y. E., Despa, D., & Wardono, H. (2023). Pengaruh Fly Ash Terhadap Kekuatan Beton. *Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)*, 3(2).
<https://doi.org/10.23960/Snip.v3i2.481>
- Sathe, S., & Patil, S. (2023). Experimental Analysis and Behavior of Corrosion-Damaged Fly Ash Blended Reinforced Concrete Beam Under Flexural Loading. *Journal Of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2). <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00344-9>
- Setiawati, M. (2018). *FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENGGANTI SEMEN PADA BETON* (Vol. 17).
- Solikin, M., Setiawan, B., Nurchasanah, Y., & Prayogi, S. (2022). Analisis Penetrasi Ion Klorida Pada Beton High Volume Fly Ash Mutu Tinggi Dengan Variasi Tingkat Kehalusan Fly Ash. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 425–434.
<https://doi.org/10.29103/tj.v12i2.749>
- Ulva. (2023a). Analisa Pengaruh Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash (Faba) Sebagai Pengganti Semen Dan Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Civil Engineering Collaboration*, 21–26. <https://doi.org/10.35134/jcivil.v8i2.60>
- Ulva, Netalia. (2023b). Analisa Pengaruh Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash (Faba) Sebagai Pengganti Semen Dan Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Civil Engineering Collaboration*, 8, 21–26. <https://doi.org/10.35134/jcivil.v8i2.60>
- Umboh, H., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2014). Pengaruh Pemanfaatan Abu Terbang (Fly Ash) Dari Pltu Ii Sulawesi Utara Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Sipil Statik Vol.2 No. 7*, 2(7), 352–358.

- Utami, L. H., Habsya, C. H., & Sri Agustin, R. (2023). Pengaruh Fly Ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen Terhadap Berat Isi Dan Kuat Tekan Segmen Kolom Praktis Modular Ramah Lingkungan. *IJCEE Vol.9 No.1*, 9(1), 14–21.
- Zakirullah, M., Anggraini, R., & Fajriansyah, D. (2024a). ANALISA PENGGUNAAN FLY ASH PLTU OMBILIN SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KUAT TARIK BETON. *Civil Engineering Collaboration*, 1–6. <https://doi.org/10.35134/jcivil.V9i1.68>
- Zakirullah, M., Anggraini, Rita., & Fajriansyah, D. (2024b). *Analisa Penggunaan Fly Ash Pltu Ombilin Sebagai Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Beton*. 9, 1–6. <https://doi.org/10.35134/jcivil.V9i1.68>