



Kajian komparatif sinergi fly ash dalam peningkatan kinerja kuat tekan dan perbaikan zona transisi agregat daur ulang (RCA)

Pebrianto^{1*}, Monica Dewi², Susilowati³, & Olvi Pramadya Utaya Kusuma⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kahuripan Kediri

ARTICLE INFO

Article history:

Received May 08, 2026

Revised May 11, 2026

Accepted May 25, 2026

Available online May 30, 2026

Kata Kunci:

Fly ash; agregat daur ulang (RCA); zona transisi interfasial (ITZ); kuat tekan beton; kajian literatur komparatif.

Keywords:

Fly ash; recycled concrete aggregate; interfacial transition zone; compressive strength; comparative literature review



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

Copyright © 2026 by Author. Published by Pintarologi Media.

ABSTRAK

Industri konstruksi di Indonesia menghasilkan limbah beton dalam jumlah besar sekaligus emisi karbon yang tinggi, sementara pemanfaatan fly ash dari 230 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) baru mencapai sekitar 12% per tahun. Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas substitusi fly ash dalam meningkatkan kuat tekan beton yang mengandung Agregat Daur Ulang (Recycled Concrete Aggregate/RCA) serta mekanisme perbaikannya terhadap Zona Transisi Interfasial (ITZ) ganda pada RCA. Kajian dilakukan melalui pendekatan kajian literatur komparatif kuantitatif terhadap 44 jurnal ilmiah, di mana 17 di antaranya lolos seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Data kuat tekan dari berbagai penelitian dinormalisasi menggunakan Rasio Peningkatan Kuat Tekan (RPK) agar dapat dibandingkan secara setara. Hasil kajian menunjukkan bahwa efektivitas fly ash bersifat kondisional terhadap kualitas RCA yang digunakan: pada RCA bermutu tinggi (abrasi di bawah 30%), substitusi fly ash 10% meningkatkan kuat tekan hingga melampaui beton normal pada seluruh variasi RCA, sedangkan pada RCA bermutu rendah (keausan 37%) penambahan fly ash justru menurunkan kuat tekan secara progresif. Proporsi fly ash 10% direkomendasikan sebagai titik awal substitusi yang aman untuk perencanaan campuran beton RCA yang berkelanjutan di Indonesia.

ABSTRACT

The construction sector in Indonesia generates large volumes of concrete waste alongside high carbon emissions, while the utilization of fly ash from 230 coal-fired power plants remains at only around 12% per year. This study aims to examine the effectiveness of fly ash substitution in improving the compressive strength of concrete containing Recycled Concrete Aggregate (RCA) and to clarify the mechanism by which fly ash repairs the double Interfacial Transition Zone (ITZ) characteristic of RCA. A quantitative comparative literature review was conducted on 44 scientific journals, of which 17 met the inclusion and exclusion criteria. Compressive strength data from the selected studies were normalized using a Compressive Strength Improvement Ratio (RPK) to allow fair comparison across differing mix conditions. The findings show that the effectiveness of fly ash is conditional on RCA quality: when RCA is sourced from high-quality concrete (abrasion below 30%), a 10% fly ash substitution increased compressive strength beyond that of normal concrete across all RCA proportions, whereas for low-quality RCA (abrasion value of 37%) the addition of fly ash progressively reduced compressive strength instead. A 10% fly ash proportion is recommended as a safe starting point for designing sustainable RCA concrete mixes in Indonesia.

1. PENDAHULUAN

Sektor konstruksi di Indonesia tumbuh pesat seiring meningkatnya kebutuhan infrastruktur, namun pertumbuhan ini membawa konsekuensi lingkungan yang tidak dapat diabaikan. Industri semen menyumbang sekitar 8% dari total emisi karbon dioksida (CO₂) global (Gao dkk., 2021), sementara aktivitas konstruksi dan pembongkaran bangunan di Indonesia menghasilkan limbah yang diperkirakan mencapai 29 juta ton per tahun, yang sebagian besar berakhir di tempat pembuangan akhir tanpa dimanfaatkan kembali (Akbari dkk., 2025).

*Corresponding author

E-mail addresses: okepebrianto@gmail.com (Pebrianto)

Dua pendekatan inovasi material telah mendapat perhatian besar sebagai solusi atas kondisi tersebut. Pertama, pemanfaatan limbah beton sebagai Agregat Daur Ulang (*Recycled Concrete Aggregate/RCA*), yang telah terbukti layak secara teknis untuk berbagai kelas beton struktural (Romadhon & Garside, 2021; Amin & Selena, 2025). Kedua, substitusi parsial semen dengan fly ash, yaitu abu terbang hasil pembakaran batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Indonesia memiliki 230 PLTU yang berpotensi besar menghasilkan fly ash, namun pemanfaatannya baru mencapai sekitar 12% per tahun dari total produksi (Rosyidi dkk., 2024), sehingga terdapat kesenjangan signifikan antara potensi material dan tingkat pemanfaatan aktualnya.

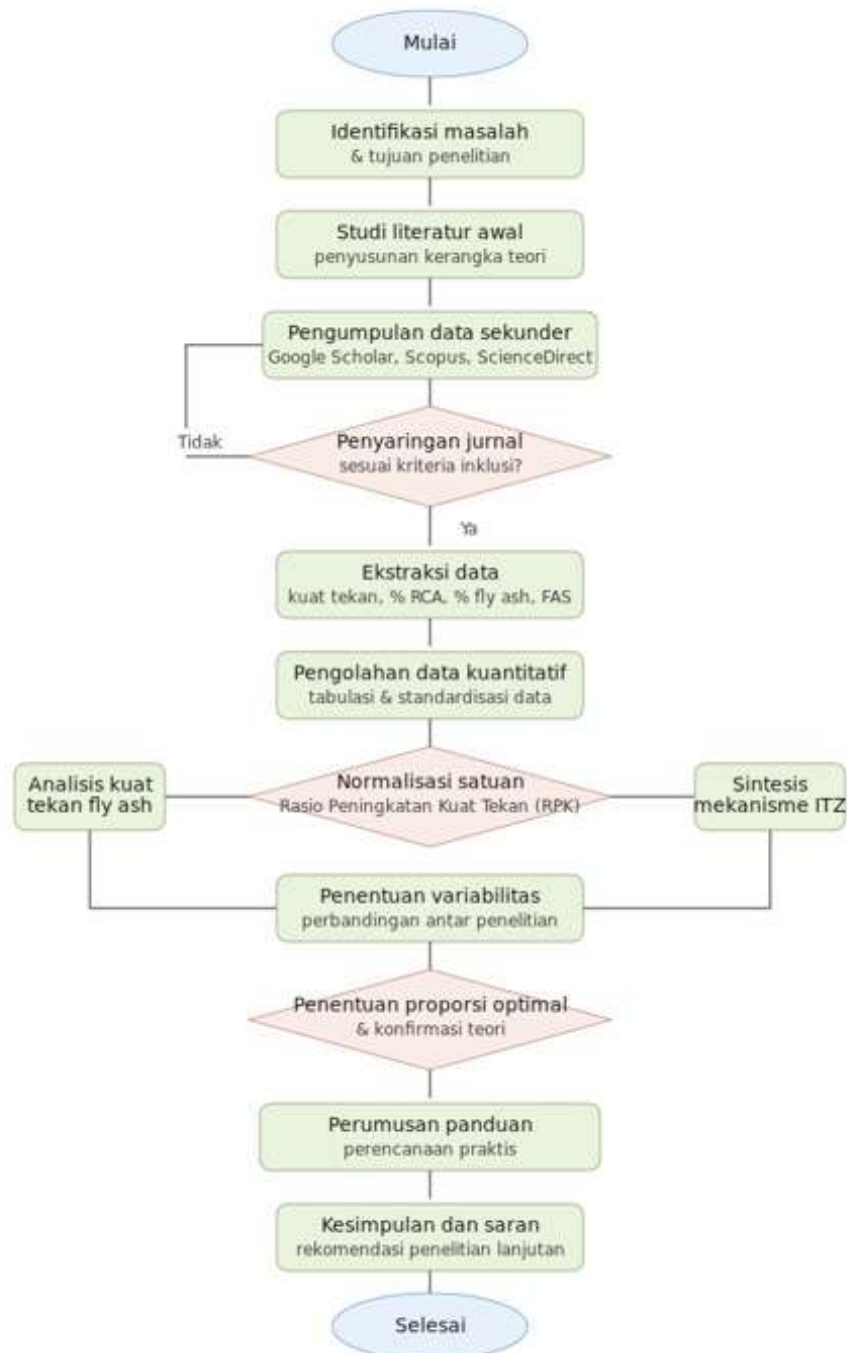
Kedua pendekatan ini berpotensi saling melengkapi secara sinergis. RCA memiliki kelemahan struktural *khas* berupa mortar lama yang menempel pada permukaannya, sehingga menimbulkan dua Zona Transisi Interfasial (*Interfacial Transition Zone/ITZ*) sekaligus dalam satu campuran beton — satu antara agregat inti dengan mortar lama, dan satu lagi antara mortar lama dengan pasta semen baru (Jamil dkk., 2025). ITZ ganda ini menjadi titik lemah utama yang menurunkan kuat tekan, kuat tarik, maupun kuat geser beton RCA (Sian dkk., 2013). Fly ash, di sisi lain, memiliki sifat pozzolanik yang secara kimiawi dapat mengisi dan memadatkan zona pori pada ITZ melalui pembentukan Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) sekunder (Bahar & Wiranto, 2024), sehingga secara teoritis menjadikannya agen perbaikan yang ideal bagi kelemahan intrinsik RCA.

Meskipun secara teoritis menjanjikan, hasil-hasil penelitian empiris menunjukkan variasi yang cukup *signifikan*. Punusingon & Pandaleke (2019) mencatat kuat tekan optimum pada substitusi fly ash 10% dalam beton RCA, sementara Diana Ningrum dkk. (2021) menemukan hasil terbaik pada kombinasi RCA 75% dengan fly ash 10%. Sebaliknya, Rochman dkk. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan beton RCA tidak cukup hanya dengan menambah semen, melainkan memerlukan inovasi Supplementary Cementitious Material (SCM) yang tepat. Keberagaman hasil ini mengindikasikan bahwa performa sinergi fly ash pada beton RCA sangat bergantung pada proporsi yang digunakan, dan belum ada konsensus yang jelas mengenai rentang proporsi optimal yang berlaku umum. Sebagian besar studi terdahulu juga menguji fly ash dalam kombinasi dengan perlakuan RCA lain seperti carbonation (Jamil dkk., 2025) atau coating pozzolan (Kumbhar dkk., 2024), sehingga sulit mengisolasi kontribusi murni fly ash sebagai substitusi semen parsial dalam memperbaiki ITZ RCA.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur komparatif *kuantitatif* untuk menjawab tiga pertanyaan: bagaimana efektivitas substitusi fly ash dalam meningkatkan kuat tekan beton RCA dibandingkan beton RCA murni; bagaimana mekanisme sinergi fly ash bekerja dalam mengatasi kelemahan ITZ ganda; dan berapa rentang proporsi substitusi fly ash yang dapat direkomendasikan sebagai proporsi optimal. Sejalan dengan pertanyaan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis secara komparatif efektivitas fly ash terhadap kuat tekan beton RCA, menjelaskan mekanisme sinergi fly ash dalam perbaikan ITZ ganda, dan menentukan rentang proporsi substitusi fly ash yang paling efektif sebagai panduan perencanaan campuran beton RCA yang berkelanjutan bagi praktik konstruksi di Indonesia.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur komparatif kuantitatif (*quantitative comparative literature review*), yaitu metode yang mengumpulkan, menyeleksi, mengekstraksi, dan menganalisis data numerik dari berbagai publikasi ilmiah untuk menjawab pertanyaan penelitian secara sistematis (Bahar & Wiranto, 2024). Pendekatan ini dipilih karena topik penelitian bersifat *multi-variabel* dan lintas studi, sehingga kajian komparatif memungkinkan kesimpulan yang lebih representatif dibandingkan satu eksperimen tunggal, sekaligus karena penelitian ini tidak melakukan pengujian laboratorium dan seluruh data bersumber dari hasil pengujian yang telah dipublikasikan. Secara keseluruhan, desain penelitian ini mengikuti alur sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Data sekunder dikumpulkan melalui basis data akademik Google Scholar, Scopus, dan ScienceDirect menggunakan kombinasi kata kunci “agregat daur ulang fly ash kuat tekan”, “recycled concrete aggregate fly ash compressive strength”, “RCA supplementary cementitious materials”, dan “interfacial transition zone recycled aggregate” beserta variasinya. Artikel yang disertakan dalam kajian harus membahas RCA dan/atau fly ash sebagai komponen campuran beton, menyajikan data kuantitatif kuat tekan (MPa atau kg/cm^2), mencantumkan variabel penelitian yang jelas, merupakan artikel peer-reviewed, serta diterbitkan pada rentang 2013–2026 dengan prioritas 2019–2026. Artikel dikeluarkan apabila tidak menyajikan data numerik, menggunakan RCA dengan perlakuan pendahuluan kimia intensif (acid treatment, carbonation, atau heating) sebagai variabel utama, bukan merupakan penelitian eksperimental, atau menggunakan data yang tidak dapat dikonversi ke satuan yang sebanding. Setiap literatur yang lolos seleksi selanjutnya dinilai kualitasnya berdasarkan kredibilitas jurnal, kelengkapan data, dan relevansi topik terhadap kombinasi RCA dan fly ash.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah persentase substitusi fly ash terhadap berat semen (0–30%) dan persentase RCA terhadap total agregat kasar (0–100%), dengan kuat tekan beton pada umur 28 hari sebagai variabel terikat utama. Faktor Air Semen (FAS), kelas fly ash (F, C, atau N), sumber RCA, dan metode curing dicatat sebagai variabel kontrol pada setiap sumber data.

Karena data yang dikumpulkan berasal dari berbagai penelitian dengan kondisi campuran yang berbeda-beda, diperlukan parameter normalisasi agar perbandingan antar penelitian dapat dilakukan secara adil. Parameter yang digunakan adalah Rasio Peningkatan Kuat Tekan (RPK), yang didefinisikan sebagai:

$$RPK = (f'c \text{ uji} / f'c \text{ kontrol}) \times 100\% \quad (1)$$

dengan $f'c$ uji adalah kuat tekan beton dengan variasi fly ash pada umur 28 hari, dan $f'c$ kontrol adalah kuat tekan beton RCA tanpa fly ash (0% fly ash) pada umur 28 hari dari penelitian yang sama. Nilai RPK di atas 100% menunjukkan peningkatan kuat tekan akibat penambahan fly ash, sedangkan RPK di bawah 100% menunjukkan penurunan. Setelah RPK dihitung untuk setiap titik data, analisis komparatif dilakukan melalui tabulasi matriks data berdasarkan variasi % RCA dan % fly ash, analisis tren RPK terhadap variasi % fly ash, identifikasi titik optimum yang konsisten lintas studi, serta analisis variabilitas antar penelitian. Selain analisis kuantitatif, penelitian ini juga melakukan sintesis kualitatif terhadap mekanisme perbaikan ITZ yang dilaporkan berbagai literatur untuk memberikan dasar teoritis atas pola kuantitatif yang ditemukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Proses pengumpulan literatur melalui Google Scholar, Scopus, dan ScienceDirect berhasil menjangkit 44 jurnal yang secara tematis berkaitan dengan topik penelitian. Setelah disaring berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, sebanyak 17 jurnal dinyatakan lolos, dengan rincian sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Proses Penyaringan Literatur

Tahapan Seleksi	Jumlah
Total jurnal yang berhasil dikumpulkan	44
Dikeluarkan — tidak memuat data kuat tekan numerik	9
Dikeluarkan — topik tidak relevan dengan RCA/fly ash	8
Dikeluarkan — RCA dengan perlakuan pendahuluan intensif	7
Dikeluarkan — tahun publikasi di luar rentang prioritas	3
Total jurnal yang lolos dan digunakan dalam kajian	17
— sebagai sumber data primer (data numerik)	6
— sebagai sumber data pendukung teori dan konteks	11

Sumber: analisis penulis (2026).

Dari 6 jurnal yang menjadi sumber data primer, terdapat keragaman karakteristik yang cukup signifikan pada persentase RCA, kelas fly ash, nilai FAS, dan sumber material, sebagaimana dirangkum pada Tabel 2. Keragaman inilah yang menjadi justifikasi metodologis penggunaan RPK sebagai parameter normalisasi.

Tabel 2. Karakteristik Umum Sumber Data Primer

Peneliti (Tahun)	% RCA	Variasi FA (%)	Kelas FA	Sumber RCA	Umur Uji
Diana Ningrum dkk. (2021)	0% & 75%	0, 20, 30	C	Sisa benda uji lab	7 hr→konversi 28 hr
Punusingon dkk. (2019)	100%	0, 5, 10, 15, 20	F	Sisa benda uji lab	7 hari
Ismail dkk. (2012)	25, 50, 75, 100%	10 (tetap)	—	Limbah tiang pancang	28 hari
Ferdiansyah & Rochmah (2022)	0%	0, 5, 10, 12, 15, 20	N	— (tanpa RCA)	28 hari

Peneliti (Tahun)	% RCA	Variasi FA (%)	Kelas FA	Sumber RCA	Umur Uji
Yudi dkk. (2025)	25%	FA treated	F	Laboratorium	28 hari
Hina (2026)	0%	0, 20	—	— (tanpa RCA)	28 hari

Sumber: analisis penulis (2026).

Data Diana Ningrum dkk. (2021) memberikan temuan yang paling menonjol dalam kelompok data yang menguji kombinasi langsung RCA dan fly ash (Tabel 3). Pada campuran tanpa RCA, penambahan fly ash 20% meningkatkan kuat tekan sebesar 18,89% dibandingkan beton normal, namun pada campuran RCA 75%, penambahan fly ash justru menurunkan kuat tekan secara progresif — dari 18,210 MPa (FA 0%) menjadi 16,059 MPa (FA 20%) dan 13,501 MPa (FA 30%), yang mengindikasikan bahwa nilai keausan RCA yang tinggi (37%) membatasi manfaat perbaikan ITZ oleh fly ash.

Tabel 3. Data Kuat Tekan Beton — Diana Ningrum dkk. (2021)

Variasi	RCA (%)	Fly Ash (%)	f_c 28 hari (MPa)	RPK terhadap kontrol RCA (%)
RCA 0% + FA 0%	0	0	21,535	— (referensi NCA)
RCA 0% + FA 20%	0	20	25,603	118,89%
RCA 0% + FA 30%	0	30	20,942	97,25%
RCA 75% + FA 0%	75	0	18,210	100% ← kontrol
RCA 75% + FA 20%	75	20	16,059	88,19%
RCA 75% + FA 30%	75	30	13,501	74,14%

Catatan: RPK dihitung terhadap beton kontrol RCA 75% + FA 0% (18,210 MPa) sebagai basis 100%.

Sebagai kontras, Ismail dkk. (2012) yang menggunakan RCA bersumber dari limbah tiang pancang bermutu tinggi (K-350) dengan fly ash tetap 10% menunjukkan bahwa seluruh variasi RCA (25–100%) menghasilkan kuat tekan di atas beton normal. Demikian pula Yudi dkk. (2025) mencatat peningkatan kuat tekan sebesar 1,64% pada RCA 25% yang direndam suspensi fly ash, sementara Ferdiansyah & Rochmah (2022) pada beton tanpa RCA mencatat titik optimum RPK 102,36% pada fly ash 10%. Sintesis dari seluruh sumber data ini dirangkum pada Tabel 4, yang memperlihatkan pola RPK optimum, kondisi fly ash, dan kualitas RCA masing-masing penelitian.

Tabel 4. Matriks Sintesis Komparatif Data Kuat Tekan

Peneliti (Tahun)	RCA (%)	FA Optimum (%)	RPK Optimum (%)	Kualitas RCA
Ferdiansyah & Rochmah (2022)	0%	10%	102,36%	— (agregat alami)
Hina (2026)	0%	20%	104,64%	— (agregat alami)
Diana Ningrum dkk. (2021) — RCA 0%	0%	20%	118,89%	—
Diana Ningrum dkk. (2021) — RCA 75%	75%	0%	100%	Keausan 37% (rendah)
Ismail dkk. (2012)	25–100%	10% (tetap)	>100% semua variasi	Tiang pancang K-350 (tinggi)
Yudi dkk. (2025)	25%	FA treated	101,64%	Laboratorium (sedang)
Punusingon dkk. (2019)	100%	20% (7 hari)	124,65% (7 hari)	Sisa lab, abrasi 34,4%

Sumber: analisis penulis (2026).

Pembahasan

Temuan paling signifikan dari analisis komparatif ini adalah bahwa efektivitas sinergi fly ash pada beton RCA tidak bersifat universal, melainkan kondisional terhadap kualitas RCA yang digunakan. Perbandingan dua ekstrem memperjelas pola ini: Ismail dkk. (2012) dengan RCA dari tiang pancang bermutu tinggi menunjukkan bahwa fly ash 10% meningkatkan kuat tekan pada seluruh variasi RCA,

sedangkan Diana Ningrum dkk. (2021) dengan RCA berkeausan tinggi (37%) menunjukkan penurunan kuat tekan pada RCA 75%. Secara mekanistik, fly ash bekerja memperbaiki ITZ dengan mengisi pori dan membentuk C-S-H sekunder, tetapi perbaikan ini terbatas pada zona antarmuka; apabila agregat itu sendiri memiliki kelemahan intrinsik yang tinggi, keruntuhan akan terjadi melalui badan agregat, bukan melalui zona ITZ, sehingga perbaikan ITZ oleh fly ash tidak cukup mengangkat kuat tekan secara keseluruhan.

Dua mekanisme saling melengkapi mendasari perbaikan ini. Mekanisme filler fisik bekerja segera setelah pencampuran — terkonfirmasi dari data Ferdiansyah & Rochmah (2022) yang mencatat kuat tekan 7 hari lebih tinggi pada FA 10% (33,8 MPa) dibandingkan kontrol (31,2 MPa), padahal reaksi pozzolanik belum berkembang penuh pada umur tersebut, serta dari data Yudi dkk. (2025) yang menunjukkan peningkatan berat jenis RCA setelah perendaman suspensi fly ash. Mekanisme kedua, reaksi pozzolanik kimiawi, berlangsung bertahap mulai umur 14–28 hari ketika silika reaktif dalam fly ash bereaksi dengan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen membentuk C-S-H sekunder (Bahar & Wiranto, 2024; Memon dkk., 2022). Keberadaan Double ITZ pada RCA secara paradoks menyediakan lebih banyak Ca(OH)_2 yang dapat dikonsumsi oleh reaksi ini, sehingga potensi perbaikan oleh fly ash secara teoritis lebih besar pada beton RCA dibandingkan beton normal — dengan syarat kualitas RCA cukup baik untuk mendukung proses tersebut.

Kajian ini juga mengonfirmasi adanya batas atas persentase fly ash, di mana penambahan lebih lanjut menjadi kontraproduktif. Penggantian semen yang berlebihan mengurangi produksi awal Ca(OH)_2 sehingga fly ash berlebih menjadi inert filler yang tidak bereaksi; kelebihan partikel halus juga meningkatkan kebutuhan air untuk mempertahankan workability, yang pada gilirannya menaikkan FAS efektif; dan khusus untuk fly ash Kelas C seperti pada Diana Ningrum dkk. (2021), kadar CaO yang tinggi pada proporsi berlebih dapat menghasilkan produk hidrasi yang ekspansif dan tidak stabil (Ginting dkk., 2025). Berdasarkan sintesis seluruh data, rekomendasi proporsi fly ash menurut kategori kualitas RCA dirangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekomendasi Proporsi Fly Ash Berdasarkan Kualitas RCA

Kategori RCA	Kriteria Fisik	% FA Optimal	% RCA Maks	Catatan
RCA Bermutu Tinggi	Abrasi <30%, absorpsi <5%	10%	Hingga 100%	Sinergi FA optimal (Ismail dkk., 2012)
RCA Bermutu Sedang	Abrasi 30–40%, absorpsi 5–9%	10–15%	Hingga 50%	Perlu pre-conditioning SSD (Yudi dkk., 2025)
RCA Bermutu Rendah	Abrasi >40%, absorpsi >9%	<10% / tidak disarankan	Hingga 25%	FA tidak mengkompensasi kelemahan agregat (Memon dkk., 2022)

Sumber: analisis penulis (2026).

Titik 10% muncul secara konsisten sebagai proporsi yang paling aman lintas berbagai kondisi penelitian, sejalan dengan temuan Ferdiansyah & Rochmah (2022), Ismail dkk. (2012), dan Yudi dkk. (2025), sementara fly ash Kelas C sebaiknya dibatasi tidak lebih dari 15% mengingat sifat hidrolis parsialnya. Temuan ini relevan bagi kondisi Indonesia yang memiliki 230 PLTU penghasil fly ash dengan tingkat pemanfaatan baru 12% (Rosyidi dkk., 2024) serta limbah konstruksi sekitar 29 juta ton per tahun (Akbari dkk., 2025); kombinasi RCA dan fly ash sekaligus mengatasi dua persoalan limbah dalam satu solusi material berkelanjutan, dengan potensi penghematan emisi sekitar 0,9 ton CO_2 untuk setiap ton semen yang digantikan fly ash (Ginting dkk., 2025). Penerapan di lapangan tetap memerlukan prasyarat praktis, yaitu karakterisasi abrasi dan absorpsi RCA sebelum digunakan, identifikasi kelas fly ash yang tersedia, pre-conditioning RCA dalam kondisi Saturated Surface Dry (SSD), serta uji mix design awal di laboratorium sebagai acuan sebelum penerapan skala lapangan.

Sebagai kajian literatur komparatif, penelitian ini memiliki keterbatasan yang perlu dicatat secara transparan. Data Diana Ningrum dkk. (2021) berbasis pengujian 7 hari yang dikonversi ke 28 hari menggunakan faktor konversi SNI, yang mungkin tidak sepenuhnya akurat untuk fly ash Kelas C; data Punusingon dkk. (2019) hanya tersedia pada umur 7 hari sehingga hanya digunakan sebagai referensi kualitatif; variasi nilai FAS antar penelitian dapat memengaruhi hasil secara independen dari variabel fly ash dan RCA; serta jumlah penelitian yang secara langsung menguji kombinasi variasi RCA dan variasi fly ash secara bersamaan masih sangat terbatas, sehingga kesimpulan yang ditarik tetap memerlukan konfirmasi dari lebih banyak studi eksperimental, khususnya dengan RCA bermutu menengah (K-200 hingga K-250) yang lebih representatif bagi konstruksi umum di Indonesia, pengujian pada umur yang lebih panjang (56 dan 90 hari), serta analisis mikrostruktur menggunakan SEM untuk mengonfirmasi perbaikan ITZ secara visual.

4. SIMPULAN

Kajian literatur komparatif kuantitatif terhadap 44 jurnal ilmiah, dengan 17 jurnal yang lolos seleksi, menunjukkan bahwa efektivitas substitusi fly ash dalam meningkatkan kuat tekan beton RCA bersifat kondisional dan bukan solusi universal, karena sangat bergantung pada kualitas RCA yang digunakan. Pada beton RCA yang bersumber dari material bermutu tinggi (abrasi di bawah 30%, absorpsi di bawah 5%), substitusi fly ash 10% terbukti mampu menghasilkan kuat tekan yang melampaui beton normal pada seluruh variasi persentase RCA, mulai dari 25% hingga 100%. Sebaliknya, pada RCA bermutu rendah dengan nilai keausan tinggi (37%), penambahan fly ash justru menurunkan kuat tekan secara progresif, dari RPK 100% menjadi hanya 74,14% pada kombinasi RCA 75% dan fly ash 30%, karena kelemahan intrinsik agregat tidak dapat dikompensasi oleh perbaikan ITZ semata.

Kajian ini juga mengonfirmasi secara empiris bahwa fly ash memperbaiki Double ITZ pada beton RCA melalui dua mekanisme yang saling melengkapi, yaitu efek filler fisik yang bekerja segera setelah pencampuran dengan mengisi pori pada zona transisi, dan reaksi pozzolanik kimiawi yang berlangsung bertahap mulai umur 14 hingga 28 hari melalui pembentukan C-S-H sekunder dari reaksi silika reaktif dengan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen. Keberadaan Double ITZ pada RCA secara paradoks menyediakan Ca(OH)_2 yang lebih melimpah bagi reaksi pozzolanik, sehingga potensi perbaikan oleh fly ash secara teoritis lebih besar pada beton RCA dibandingkan beton normal, dengan syarat kualitas RCA cukup mendukung.

Berdasarkan sintesis data yang dikaji, proporsi fly ash sebesar 10% merupakan titik yang paling konsisten menghasilkan peningkatan kuat tekan lintas berbagai kondisi penelitian dan dapat dijadikan titik awal yang aman bagi perencanaan campuran beton RCA. Pada RCA bermutu tinggi, proporsi dapat ditingkatkan hingga 10–15% terutama dengan fly ash Kelas F, sedangkan proporsi di atas 20% tidak direkomendasikan karena risiko kelebihan material halus yang tidak bereaksi sempurna. Untuk fly ash Kelas C, proporsi sebaiknya dibatasi tidak lebih dari 15% mengingat sifat hidrolik parsialnya yang dapat menghasilkan produk hidrasi tidak stabil pada proporsi berlebih. Praktisi konstruksi disarankan untuk terlebih dahulu melakukan karakterisasi fisik RCA — khususnya nilai abrasi dan absorpsi — sebelum menetapkan proporsi fly ash, memastikan kondisi RCA dalam keadaan *Saturated Surface Dry* sebelum pencampuran, mengidentifikasi kelas fly ash yang tersedia dari sumber PLTU terdekat, serta melakukan uji mix design awal di laboratorium, terutama untuk aplikasi pada beton struktural kelas menengah (f_c' 20–30 MPa) yang umum digunakan pada konstruksi gedung, perkerasan jalan, dan infrastruktur sipil skala sedang di Indonesia. Penelitian eksperimental terkontrol yang memvariasikan persentase RCA dan fly ash secara bersamaan, standarisasi karakterisasi RCA, pengujian pada umur yang lebih panjang, analisis mikrostruktur menggunakan SEM, serta kajian durabilitas pada lingkungan agresif tetap diperlukan untuk memperkuat dan memperluas rekomendasi yang dihasilkan oleh kajian ini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Akbari, S. H., dkk. (2025). BATACO: Konstruksi Hijau dari Limbah Beton dan Plastik PET. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 12(1), 45–58.
- Amin, M. A. R., & Selena. (2025). Analisis Efisiensi Beton Daur Ulang sebagai Alternatif Agregat pada Konstruksi Berkelanjutan. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 14(2), 88–101.
- Bahar, F. F., & Wiranto, S. (2024). Inovasi Material dalam Beton Berkelanjutan: Studi Literatur tentang Pemanfaatan Fly Ash dengan Peningkatan Kekuatan Beton. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 11(1), 23–35.
- Diana Ningrum, D., Wijaya, H. S., & Soares, V. (2021). Pengaruh Penambahan Fly Ash pada Sifat Mekanik Beton Daur Ulang dengan Mutu Beton $f_c' = 19,3$ MPa. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur (SENTIKUIN)*, 4, C1.1–C1.11.
- Ferdiansyah, M. A. R., & Rochmah, N. (2022). Pengaruh Penggunaan Fly Ash pada Beton Mutu Tinggi terhadap Nilai Kuat Tekan. *Jurnal Sondir*, 6(2), 34–41.
- Gao, Y., dkk. (2021). Carbon Emission Characteristics and Reduction Measures of the Construction Industry in China. *Ecological Indicators*, 121, 107167. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107167>
- Ginting, A., dkk. (2025). Perbandingan Penggunaan Fly Ash dengan Kalsium Karbonat sebagai Bahan Tambah Semen. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(1), 12–24.
- Hina, D. S. U. (2026). Analisis Kinerja Beton Ramah Lingkungan Berbasis Fly Ash dan Slag terhadap Kuat Tekan dan Durabilitas. *JITESNA: Jurnal Ilmu Teknik Sipil Indonesia*, 2(1), 8–13.
- Ismail, A. G., dkk. (2012). Pengaruh Beton Daur Ulang dan Bahan Tambah Fly Ash terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Struktural Ramah Lingkungan. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 1(1), 59–63.
- Jamil, S., dkk. (2025). Investigating the Mechanical and Durability Properties of Carbonated Recycled Aggregate Concrete and Its Performance with SCMs. *Construction and Building Materials*, 410, 134267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134267>

- Kumbhar, P., dkk. (2024). Comparative Study on Properties of Recycled Aggregate Concrete Using Recycled Aggregates Coated with Different Pozzolanic Materials. *Journal of Building Engineering*, 82, 108328. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108328>
- Memon, S. A., Bekzhanova, Z., & Murzakarimova, A. (2022). A Review of Improvement of Interfacial Transition Zone and Adherent Mortar in Recycled Concrete Aggregate. *Construction and Building Materials*, 349, 128783. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128783>
- Olii, M. R., dkk. (2023). Beton Hijau Menggunakan Fly Ash sebagai Substitusi Parsial Semen. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 5(2), 67–78.
- Punusingon, M. A., Handono, B. D., & Pandaleke, R. E. (2019). Uji Eksperimental Kuat Tekan Beton Daur Ulang dengan Bahan Tambah Abu Terbang (Fly Ash) dan Serbuk Kaca sebagai Substitusi Parsial Semen. *Jurnal Sipil Statik*, 7(1), 57–66.
- Rochman, A., dkk. (2022). Tinjauan Karakteristik Beton dengan Agregat Kasar dari Limbah Beton dengan Variasi Jumlah Semen. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 9(2), 78–91.
- Romadhon, F., & Garside, A. K. (2021). Aplikasi Perkerasan Jalan Raya Berkelanjutan dengan Pemanfaatan Daur Ulang Agregat Beton: Tinjauan Literatur. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, 5(1), 12–23.
- Rosyidi, D. H., Sulton, M., & Risdanareni, P. (2024). Durabilitas Beton yang Mengandung Agregat Ringan Buatan Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash). *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(1), 11–17. <https://doi.org/10.22225/pd.13.1.7966.11-17>
- Sian, B., dkk. (2013). Studi Eksperimental Karakteristik Beton dengan Agregat Kasar Daur Ulang dengan $f_c' = 25$ MPa. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 110–124.
- Yudi, A., dkk. (2025). Pengaruh RCA dengan Peningkatan Mutu oleh Bahan Pozzolan. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 10(1), 44–57.