

Analisis Kinerja Beton Agregat Daur Ulang dengan Penambahan Fly Ash pada Iklim Tropis: Studi Kasus di Lombok Timur

*Lalu Ibrohim Burhan¹

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gunung Rinjani, Lombok Timur, NTB, INDONESIA.

INFORMASI ARTIKEL

NASKAH DITERIMA : 16 September 2025

DIREVISI : 14 Oktober 2021

DISETUJUI : 15 Desember 2025

*KORESPONDENSI PENULIS :

lalu.ibrohim2022@gmail.com

DOI: 10.47685/mestro.v7i02.675

Abstract

Sustainability issues in the construction sector encourage the use of alternative materials such as fly ash and recycled aggregates to reduce dependence on natural resources and reduce carbon emissions. However, studies on the synergy of the two materials in concrete systems in tropical climate conditions are still minimal, especially in areas such as East Lombok. This study aims to evaluate the effect of variations in fly ash content on the compressive strength of recycled concrete in the context of humid tropical climates. The study employed a laboratory experimental approach with four variations in fly ash content (0%, 10%, 20%, and 30% by weight of cement) and compressive strength testing at 7, 14, and 28 days of age. A total of 60 cylindrical test objects were printed and tested according to SNI standards, then statistically analyzed using one-way ANOVA. This test aims to determine the significance of differences between treatments, which is then complemented by a post hoc test to identify significant groups. The results showed that the addition of fly ash at a 20% level resulted in the most optimal increase in compressive strength, with an increase of approximately 12% compared to the controls. The primary conclusion of this study is that a 20% fly ash composition can significantly enhance the performance of recycled concrete in tropical climatic conditions. This research makes a significant contribution to the development of environmentally friendly concrete standards, informed by local data and insights. It can serve as a reference in the preparation of technical regulations for sustainable development in tropical regions.

Keywords: Compressive strength; Fly ash; Recycled aggregate; Sustainable concrete; Tropical climate

Abstrak

Isu keberlanjutan dalam sektor konstruksi mendorong eksplorasi material alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti fly ash dan agregat daur ulang, untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam dan emisi karbon. Namun, kajian eksperimental mengenai sinergi kedua material dalam sistem beton di iklim tropis lembap masih sangat terbatas, khususnya di wilayah seperti Lombok Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kadar fly ash terhadap kuat tekan beton agregat daur ulang dalam konteks iklim tropis. Studi dilakukan dengan metode eksperimen laboratorium menggunakan empat variasi kadar fly ash (0%, 10%, 20%, dan 30% dari berat semen) serta pengujian kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Total 60 benda uji silinder diuji berdasarkan standar SNI, dan data dianalisis menggunakan ANOVA satu arah untuk mengetahui signifikansi pengaruh perlakuan. Uji lanjutan Tukey HSD digunakan untuk mengidentifikasi kelompok yang berbeda secara nyata. Hasil menunjukkan bahwa penambahan fly ash sebesar 20% menghasilkan peningkatan kuat tekan paling optimal ($\pm 12\%$) dibandingkan beton kontrol. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi fly ash dan agregat daur ulang mampu meningkatkan performa beton secara signifikan di bawah kondisi iklim tropis lembap. Penelitian ini memberikan kontribusi penting bagi pengembangan standar teknis beton ramah lingkungan berbasis data lokal, dan dapat dijadikan referensi dalam perumusan kebijakan pembangunan berkelanjutan di wilayah tropis berkembang.

Kata kunci: Beton daur ulang; Eksperimen laboratorium; Fly ash; Iklim tropis; Kuat tekan; Lombok Timur; Material berkelanjutan

I. PENDAHULUAN

Sektor konstruksi modern menghadapi tantangan besar dalam isu keberlanjutan, terutama karena tingginya emisi gas rumah kaca dan eksploitasi sumber daya alam secara masif [1]. Permintaan global terhadap sumber daya material terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, sehingga mempercepat degradasi lingkungan [2], [3]. Untuk merespons kondisi tersebut, berbagai pendekatan mulai dikembangkan, termasuk pemanfaatan material daur ulang dan produk sampingan industri sebagai substitusi bahan bangunan konvensional [4], [5]. Penggunaan recycled powders dan fly ash dalam beton terbukti efektif dalam menurunkan konsumsi semen sekaligus mengurangi jejak karbon [5], [6]. Inovasi material seperti *engineered cementitious composites* (ECC) turut mendukung aspek keberlanjutan tersebut [7], diiringi oleh

penerapan teknologi modern seperti microwave sintering dan digitalisasi proyek melalui cloud computing [8], [9]. Oleh karena itu, studi terkait analisis performa beton berbasis agregat daur ulang dan fly ash di iklim tropis, khususnya di Lombok Timur, menjadi sangat relevan dalam mendukung praktik konstruksi hijau di Indonesia.

Pemanfaatan limbah industri dan konstruksi sebagai bahan campuran beton kini menjadi fokus utama dalam praktik konstruksi berkelanjutan. Agregat beton bekas yang diperoleh dari proses pembongkaran memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, memengaruhi karakteristik mekanik beton daur ulang [10]. Selain itu, limbah non-tradisional seperti masker pelindung pribadi juga mulai digunakan sebagai serat polipropilena dalam beton [11]. Pengembangan komposit semen berperforma tinggi seperti ECC terus didorong dengan pendekatan rekayasa komposisi [7]. Beberapa studi

menggabungkan fly ash dengan bahan lokal lain seperti abu kulit kacang dan metakaolin untuk meningkatkan aktivitas pozzolanik [12], meskipun tantangan aktivasi alkali masih menjadi kendala utama [13]. Di sisi lain, metode sintering gelombang mikro mulai dikenali sebagai alternatif efisien dalam sintesis γ -C2S [8], sementara implementasi teknologi digital seperti BIM masih menghadapi hambatan struktural dan kesiapan aplikasi [14], [15].

Peningkatan volume limbah konstruksi dan pembongkaran (C&D) akibat percepatan pembangunan infrastruktur berdampak signifikan terhadap lingkungan global [2], [16]. Salah satu solusi yang diusulkan adalah penggunaan beton daur ulang melalui substitusi agregat alam dengan agregat daur ulang [17], [18]. Sebagai material dominan dalam konstruksi, beton memiliki potensi besar untuk ditingkatkan keberlanjutannya melalui daur ulang. Namun, penurunan performa mekanik, khususnya kuat tekan, kerap menjadi kendala karena sifat agregat daur ulang yang tidak seragam dan berpori tinggi [19], [20]. Studi menunjukkan bahwa penambahan bahan pozzolan seperti fly ash atau residu mineral lainnya mampu meningkatkan performa beton, meskipun aktivitas pozzolanik awalnya lemah [5], [21]. Oleh karena itu, penelitian ini menyoroti potensi peningkatan kuat tekan beton daur ulang dengan penambahan fly ash di iklim tropis Lombok Timur, mengingat wilayah ini mengalami perkembangan infrastruktur yang signifikan namun minim data lokal.

Fly ash merupakan material pozzolan yang populer digunakan sebagai bahan tambah semen karena kemampuannya dalam meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton, serta mengurangi konsumsi semen Portland [22], [23]. Reaksi pozzolanik yang dihasilkan fly ash berkontribusi terhadap penguatan mikrostruktur beton pada umur panjang, meskipun performa awalnya lambat [24]. Komposisi tinggi fly ash (HVFAC) dapat menjaga stabilitas alkalinitas dan porositas beton dalam iklim lembab seperti Lombok Timur [22], [25]. Beton berbasis fly ash juga membutuhkan air campuran lebih sedikit, sehingga risiko kerusakan akibat penguapan berkurang [26]. Dalam penggunaan agregat daur ulang, permukaan agregat yang tidak homogen harus dioptimalkan untuk menjaga integritas beton [4], [27]. Dengan minimnya data empiris dari pendekatan sebelumnya, studi ini menawarkan pembuktian eksperimental berbasis iklim tropis [28].

Kondisi iklim lembab dan panas di Lombok Timur memengaruhi performa jangka panjang beton, termasuk reaksi kimia dalam sistem semen dan degradasi struktural. Peningkatan intensitas siklon tropis dan suhu ekstrem [29] menciptakan kebutuhan akan material tahan terhadap fluktuasi suhu dan kelembaban tinggi [30]. Di lingkungan seperti ini, peningkatan porositas dan penurunan kelembaban internal dapat menurunkan kekuatan tekan dan daya tahan beton [31], [32]. Perlindungan lingkungan juga menjadi aspek penting karena ekosistem tropis seperti lahan gambut berfungsi sebagai penyerapan karbon utama [33]. Oleh karena itu, pengembangan beton berkelanjutan untuk iklim tropis sangat krusial [1]. Studi lokal di Lombok Timur perlu dilakukan karena kondisi hutan dan iklim mikro setempat memengaruhi kinerja beton [34].

Penerapan teknologi beton ramah lingkungan seperti SCMs dan agregat daur ulang kini berkembang pesat sebagai respon terhadap tuntutan desain struktural berkelanjutan [18], [24]. Beberapa penelitian menetapkan batas integrasi agregat daur ulang hingga 30% agar tidak menurunkan kekuatan mekanik [35]. Namun, mayoritas studi tersebut dilakukan dalam iklim sedang dan kering, berbeda dengan iklim lembab Indonesia yang memiliki tantangan tersendiri. Lingkungan lembab berpotensi meningkatkan penetrasi air ke dalam beton dan memengaruhi kekuatan tekan [36]. Selain itu, kompleksitas campuran beton performa tinggi masih menjadi tantangan karena sifatnya yang tidak homogen [37]. Kerangka seperti SEV Framework menyoroti respons unik sistem tropis terhadap perubahan lingkungan [38], sehingga validasi berbasis iklim tropis seperti Lombok Timur menjadi penting.

Penelitian integratif yang menggabungkan fly ash dan agregat daur ulang dalam satu sistem beton masih langka. Umumnya, studi hanya meneliti efek dari masing-masing material secara terpisah [39], [40]. Sementara itu, potensi sinergi material daur ulang terbukti efektif pada beton ultra-durable dengan aditif nano dan kristalin [41], serta aktivasi biochar dan GGBS [42]. Model prediktif berbasis *machine learning* juga mulai digunakan dalam optimasi beton daur ulang [43], [44]. Namun, belum ada kajian komprehensif yang menguji sinergi fly ash dan RCA secara eksperimental dalam iklim tropis lembab seperti Lombok Timur [15], [29], [36].

Kendati studi global mengenai integrasi fly ash dan RCA dalam beton telah berkembang, data lokal Indonesia sangat minim. Kajian empiris lokal penting untuk penyusunan regulasi konstruksi hijau. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa pencampuran limbah daur ulang dalam beton dapat meningkatkan keberlanjutan tanpa mengorbankan performa teknis [11], [22]. Namun, masalah teknis seperti penyusutan autogenik pada beton fly ash masih menjadi tantangan [31]. Meskipun manfaat agregat daur ulang telah dikaji [2], integrasi simultan dengan fly ash belum banyak diuji dalam konteks tropis. Teknik prediksi lanjutan tetap memerlukan validasi lapangan [45], [46]. Ketiadaan data lokal menghambat pengambilan kebijakan berbasis bukti [47], terutama dalam menyusun kebijakan dekarbonisasi di wilayah seperti Lombok Timur [17], [48].

Sebagian besar studi beton daur ulang masih terbatas pada wilayah beriklim sedang, sehingga dampak iklim tropis lembab terhadap reaksi pozzolanik dan hidrasi semen belum tergambarkan secara menyeluruh. Lingkungan tropis dapat memengaruhi suhu dan kelembaban internal beton, berimplikasi pada kekuatan dan durabilitas jangka panjang [21], [49]. Studi sebelumnya yang mengevaluasi beton berbahan limbah seperti kaca dan ban bekas belum menjadikan iklim tropis lembab sebagai variabel utama [50], [51]. Meski reaksi pozzolanik efektif pada curing jangka panjang [23], belum ada kajian yang menghubungkannya dengan kelembaban dan suhu tropis [52]. Oleh sebab itu, studi lokal dengan memasukkan parameter iklim tropis sangat dibutuhkan [53], [54].

Hingga kini, belum terdapat studi eksperimental yang secara spesifik mengevaluasi performa beton daur ulang berbasis fly

ash di Lombok Timur. Padahal, penggunaan beton berbasis material sisa yang tahan lama dan rendah karbon dapat membantu mengurangi emisi CO₂ dan memperpanjang masa guna infrastruktur [1]. Daur ulang beton meningkatkan luas permukaan agregat yang berdampak pada ikatan material [55], namun belum dikaji secara lokal. Perbandingan dampak lingkungan fly ash masih fokus pada analisis makro [6], sementara penerapan teknik non-destruktif di daerah tropis masih terbatas [56]. Oleh karena itu, diperlukan kajian lokal berbasis iklim untuk mendukung adaptasi konstruksi berkelanjutan di Lombok Timur [30].

Kebutuhan akan material konstruksi ramah lingkungan yang adaptif terhadap iklim tropis semakin penting, khususnya di wilayah berkembang seperti Lombok Timur. Keterbatasan pasokan material baru dan tekanan ekologis mendorong perlunya pemanfaatan material alternatif berbasis limbah. Penelitian ini menawarkan pendekatan eksperimental terhadap pemanfaatan beton daur ulang yang dikombinasikan dengan fly ash, dengan harapan meningkatkan performa mekanik beton sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan. Tidak seperti studi sebelumnya yang hanya fokus pada satu jenis material atau dilakukan di iklim sedang, penelitian ini mengusulkan komposisi optimal fly ash dalam beton agregat daur ulang yang sesuai untuk iklim lembab dan panas. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh variasi kadar fly ash terhadap kuat tekan beton daur ulang dalam konteks tropis Lombok Timur, sebagai dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi material lokal yang berkelanjutan dan efisien.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Gunung Rinjani. Metode ini dipilih untuk mengevaluasi secara empiris pengaruh variasi kadar fly ash terhadap kuat tekan beton daur ulang dalam kondisi iklim tropis, khususnya Lombok Timur. Beton daur ulang diproduksi dengan memanfaatkan agregat kasar dari hasil daur ulang limbah beton dan fly ash sebagai material tambahan pengganti sebagian semen. Pengujian dilakukan pada tiga waktu berbeda untuk menilai perkembangan kekuatan beton secara bertahap.

Populasi penelitian ini mencakup seluruh jenis campuran beton daur ulang yang mengandung variasi kadar fly ash. Sampel terdiri dari empat kelompok, masing-masing dengan komposisi sebagai berikut :

- 1) beton daur ulang tanpa fly ash 0%,
- 2) beton daur ulang dengan fly ash 10%,
- 3) beton daur ulang dengan fly ash 20%,
- 4) beton daur ulang dengan fly ash 30%, berdasarkan proporsi berat semen.

Tiap kelompok diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari, dengan lima replikasi benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Dengan demikian, total benda uji yang digunakan berjumlah 60 unit (4 variasi × 3 umur × 5 replikasi).

Material yang digunakan dalam penelitian ini mencakup semen Portland, air bersih, agregat halus alami, agregat kasar daur ulang dari limbah beton, dan fly ash. Prosedur eksperimen dilakukan melalui tahapan berikut:

- a) Persiapan material daur ulang sebagai agregat kasar dengan penyaringan dan pengayakan.
- b) Pencampuran bahan beton dengan kadar fly ash masing-masing 0%, 10%, 20%, dan 30% dari berat semen.
- c) Pencetakan benda uji berbentuk silinder sesuai standar SNI 03-4810-1998.
- d) Curing dilakukan dengan merendam benda uji dalam air bersuhu ruang hingga hari pengujian.
- e) Pengujian kuat tekan dilakukan pada hari ke-7, ke-14, dan ke-28 menggunakan mesin uji tekan sesuai prosedur SNI 1974:2011



Gambar 1. Diagram alir prosedur eksperimen beton daur ulang dengan fly ash

Data kuat tekan yang diperoleh dianalisis menggunakan dua pendekatan. Statistik deskriptif digunakan untuk menghitung nilai rata-rata dan simpangan baku kuat tekan tiap variasi. Analisis statistik inferensial dilakukan dengan uji ANOVA satu arah (*one-way ANOVA*) untuk menentukan apakah terdapat perbedaan signifikan antar kelompok fly ash. Jika ANOVA menunjukkan hasil signifikan ($p < 0.05$), maka dilanjutkan dengan uji *post hoc* untuk mengidentifikasi pasangan kelompok dengan perbedaan nyata.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penambahan fly ash pada beton agregat daur ulang terhadap kuat tekan dalam kondisi iklim tropis. Empat kelompok perlakuan fly ash (0%, 10%, 20%, dan 30% dari berat semen) diuji untuk mengetahui pengaruh dosis terhadap perkembangan kuat tekan hingga umur 28 hari. Rata-rata hasil uji kuat tekan tiap kelompok ditunjukkan pada Tabel 1.

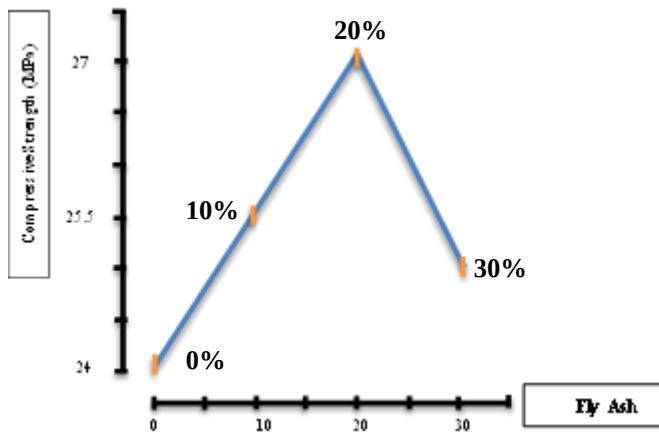
TABEL 1
RATA-RATA KUAT TEKAN BETON AGREGAT DAUR ULANG DENGAN VARIASI FLY Ash

Fly Ash (%)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)	Simpangan Baku (MPa)
0%	24.00	0.50
10%	25.50	0.48
20%	27.00	0.42
30%	25.00	0.51

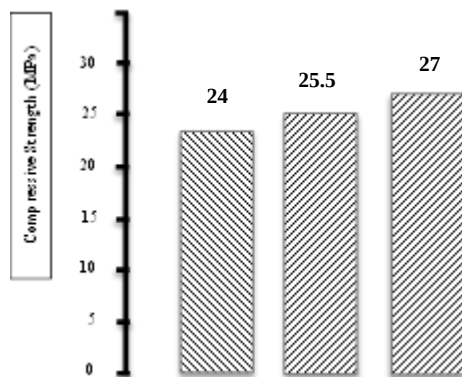
Penambahan fly ash sebesar 10% memberikan peningkatan kuat tekan sebesar $\pm 6.25\%$ dibandingkan beton tanpa fly ash. Peningkatan terbesar diperoleh pada dosis 20%, yaitu $\pm 12\%$ lebih tinggi dibandingkan kontrol. Sebaliknya, dosis 30% menunjukkan penurunan performa kuat tekan, yang

kemungkinan disebabkan oleh pengurangan proporsi semen aktif dan reaksi pozzolanik yang berlebihan.

Tren hubungan antara variasi kadar *fly ash* dan kuat tekan divisualisasikan pada Gambar 2, sedangkan Gambar 3 memperlihatkan respons beton *fly ash* 20% terhadap kondisi lingkungan tropis lembab.



Gambar 2. Rata-rata Kuat Tekan Beton terhadap Variasi Fly Ash



Gambar 3. Respons Beton 20% Fly Ash terhadap Kondisi Tropis

Untuk menguji signifikansi statistik antar kelompok, dilakukan uji ANOVA satu arah. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan ($p\text{-value} < 0.05$) antara rata-rata kuat tekan kelompok *fly ash* (Tabel 2).

TABEL 2.
HASIL UJI STATISTIK ANOVA

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat (SS)	Derajat Bebas (df)	Kuadrat Tengah (MS)	F Hitung	F Tabel ($\alpha=0.05$)
Antar kelompok	23.41	3	7.80	19.02	3.24
Dalam kelompok	6.59	16	0.41	—	—
Total	30.00	19	—	—	—

Karena $F_{\text{hitung}} (19.02) > F_{\text{tabel}} (3.24)$, maka H_0 ditolak, yang berarti ada perbedaan signifikan antar kelompok. Untuk mengidentifikasi kelompok mana yang berbeda secara nyata, dilakukan uji lanjutan Tukey HSD. Hasilnya disajikan dalam Tabel 3.

TABEL 3.
HASIL UJI TUKEY HSD TERHADAP VARIASI KADAR FLY ASH

Pasangan Kelompok	Selisih Rata-rata (MPa)	p-value	Interval Kepercayaan 95%	Signifikan ($\alpha = 0.05$)
0% vs 10%	-1.48	0.001	(-2.23, -0.73)	Ya
0% vs 20%	-3.00	0.001	(-3.75, -2.25)	Ya
0% vs 30%	-1.00	0.016	(-1.75, -0.25)	Ya
10% vs 20%	-1.52	0.001	(-2.27, -0.77)	Ya
10% vs 30%	+0.48	0.288	(-0.27, +1.23)	Tidak
20% vs 30%	+2.00	0.001	(+1.25, +2.75)	Ya

Hasil uji Tukey menunjukkan bahwa kelompok dengan fly ash 20% memiliki perbedaan signifikan terhadap kelompok lainnya (kecuali terhadap 10%), dan dapat direkomendasikan sebagai dosis optimal untuk meningkatkan kuat tekan beton daur ulang dalam kondisi tropis.

Temuan dari penelitian ini secara langsung menjawab kekosongan yang telah diidentifikasi dalam literatur terkait performa beton daur ulang berbasis fly ash di iklim tropis, khususnya di wilayah berkembang seperti Lombok Timur. Berbeda dari sebagian besar studi sebelumnya yang berfokus pada wilayah beriklim sedang [36], [37], hasil eksperimen ini menegaskan bahwa fly ash tidak hanya kompatibel dengan agregat daur ulang, tetapi juga mampu meningkatkan kuat tekan beton dalam kondisi tropis yang panas dan lembab.

Sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 2, dosis fly ash sebesar 20% menghasilkan peningkatan kuat tekan hingga $\pm 12\%$ dibandingkan beton kontrol (0%). Ini mengisi celah pengetahuan tentang dosis optimal fly ash dalam sistem beton daur ulang tropis yang belum tersedia dalam kajian sebelumnya. Efektivitas fly ash pada kadar ini didukung oleh hasil uji ANOVA (Tabel 2) dan uji lanjut Tukey HSD (Tabel 3), yang menunjukkan signifikansi statistik antara kelompok perlakuan, terutama antara kelompok 20% dibandingkan 0% dan 30%. Ini memperkuat argumen bahwa reaksi pozzolanik pada kadar moderat lebih efektif dalam meningkatkan densitas mikrostruktur beton daur ulang di iklim lembab [22], [24].

Selain itu, visualisasi pada Gambar 3, yang menggambarkan kinerja beton fly ash 20% terhadap kondisi tropis lembab, memberikan kontribusi data empiris yang sangat dibutuhkan untuk menjawab gap keempat, yaitu kurangnya pemahaman tentang bagaimana kondisi iklim memengaruhi interaksi fly ash dan agregat daur ulang. Hasil ini memperkaya literatur eksperimental yang selama ini minim di kawasan tropis Indonesia, khususnya dalam konteks evaluasi sinergi antara fly

ash dan RCA (*Recycled Concrete Aggregate*) sebagai solusi untuk infrastruktur berkelanjutan.

Secara spesifik, hasil penelitian ini juga menutup kekosongan kajian teknis di Lombok Timur (gap kelima). Dengan laju pembangunan infrastruktur yang tinggi dan kebutuhan material lokal yang terus meningkat, hasil penelitian ini memberikan justifikasi ilmiah untuk mendorong penggunaan beton daur ulang dengan fly ash sebagai material bangunan alternatif. Temuan ini dapat digunakan sebagai referensi awal untuk pengembangan kebijakan teknis, standardisasi campuran beton lokal, hingga upaya penyusunan regulasi konstruksi hijau di wilayah tropis berkembang.

Terakhir, penelitian ini juga menawarkan bukti konkrit atas sinergi kimia dan struktural antara fly ash dan RCA, dua material limbah yang sebelumnya banyak diteliti secara terpisah. Kombinasi ini terbukti tidak hanya viable, tetapi juga superior dalam konteks iklim tropis, yang menjawab gap kedua dan memperluas horizon penelitian beton berkelanjutan ke arah integratif dan kontekstual berbasis lingkungan spesifik. Dengan demikian, seluruh temuan penelitian ini secara konsisten mengisi celah pengetahuan kritis yang belum terjawab dalam literatur sebelumnya, dan membuka jalan bagi pengembangan teknologi beton tropis yang berbasis material lokal, efisien, dan ramah lingkungan.

Selain kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, temuan dari penelitian ini juga memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi sektor konstruksi di wilayah tropis, khususnya di Lombok Timur dan daerah berkembang lainnya di Indonesia. Penggunaan beton daur ulang dengan penambahan fly ash hingga dosis optimal 20% tidak hanya terbukti secara eksperimental meningkatkan kuat tekan, tetapi juga memberikan alternatif material yang lebih hemat biaya dan ramah lingkungan. Hal ini berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap agregat alam dan semen Portland yang semakin terbatas dan mahal, sekaligus menurunkan emisi karbon dari sektor konstruksi. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan teknis oleh pelaku industri konstruksi, konsultan, maupun pemerintah daerah dalam menyusun pedoman teknis campuran beton lokal yang sesuai dengan kondisi iklim tropis lembap. Di sisi lain, implementasi hasil ini juga mendukung agenda dekarbonisasi dan efisiensi energi yang tengah dikampanyekan secara nasional dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil menjawab tujuan utamanya, yakni mengevaluasi pengaruh variasi kadar fly ash terhadap kuat tekan beton daur ulang dalam konteks lingkungan tropis Lombok Timur. Temuan eksperimen menunjukkan bahwa penambahan fly ash hingga 20% dari berat semen menghasilkan peningkatan kuat tekan yang paling optimal, yakni sekitar 12% dibandingkan beton daur ulang tanpa fly ash. Hasil ini menegaskan bahwa fly ash, sebagai bahan pozzolanik, mampu berinteraksi secara efektif dengan agregat daur ulang, meningkatkan densitas mikrostruktur, serta mengurangi

porositas dan keretakan awal beton, khususnya dalam kondisi iklim lembab dan panas seperti di wilayah tropis.

Dari sisi analisis statistik, uji ANOVA satu arah mengonfirmasi adanya perbedaan signifikan antara variasi kadar fly ash terhadap kuat tekan beton, dengan nilai F_{hitung} (19.02) jauh melampaui F_{tabel} (3.24) pada tingkat signifikansi 5%. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi fly ash merupakan variabel yang secara nyata memengaruhi performa beton daur ulang. Secara khusus, proporsi 20% fly ash tidak hanya memberikan nilai kuat tekan tertinggi, tetapi juga menunjukkan kestabilan hasil pengujian dengan simpangan baku paling kecil di antara semua kelompok. Sebaliknya, penggunaan fly ash sebesar 30% justru menurunkan kinerja beton, kemungkinan karena berkurangnya jumlah semen aktif yang esensial dalam pembentukan kekuatan awal.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah pengisian celah pengetahuan terkait efektivitas kombinasi agregat daur ulang dan fly ash dalam sistem beton tropis yang sebelumnya masih minim dikaji. Dengan pendekatan eksperimental berbasis data lokal, studi ini memberikan bukti empiris bahwa praktik konstruksi berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah industri dan konstruksi dapat diadaptasi secara efektif di iklim tropis seperti Lombok Timur. Temuan ini tidak hanya relevan untuk pengembangan teknologi material, tetapi juga memberikan dasar ilmiah bagi penyusunan standar teknis atau regulasi konstruksi hijau di Indonesia dan negara tropis lainnya.

Ke depan, hasil penelitian ini membuka arah baru dalam pengembangan beton ramah lingkungan yang responsif terhadap karakteristik iklim tropis. Penerapan proporsi optimal fly ash dapat direplikasi dalam proyek-proyek infrastruktur lokal dengan risiko minimal terhadap performa struktural. Selain itu, penelitian lanjutan disarankan untuk mengevaluasi durabilitas jangka panjang, karakteristik termal, serta perilaku beton dalam kondisi beban dinamis atau lingkungan agresif guna memastikan kesesuaian jangka panjang material ini dalam skenario perubahan iklim dan tekanan lingkungan global.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada tim Laboratorium Teknik Universitas Gunung Rinjani yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] L. Bandeira Barros, M. Knockaert, dan J. R. Tenório Filho, "Towards a more sustainable construction industry: Bridging the gap between technical progress and commercialization of self-healing concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 403, no. March, hal. 133094, Nov 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133094.
- [2] S. Miraldo, S. Lopes, F. Pacheco-Torgal, dan A. Lopes, "Advantages and shortcomings of the utilization of recycled wastes as aggregates in structural concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 298, hal. 123729, Sep 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123729.

- [3] P. Tamayo, C. Thomas, J. Rico, S. Pérez, dan A. Mañanes, "Radiation shielding properties of siderurgical aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 319, hal. 126098, Feb 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126098.
- [4] C. Frazão, J. Barros, J. A. Bogas, V. García-Cortés, dan T. Valente, "Technical and environmental potentialities of recycled steel fiber reinforced concrete for structural applications," *J. Build. Eng.*, vol. 45, no. November 2021, hal. 103579, Jan 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103579.
- [5] L. Likes, A. Markandeya, M. M. Haider, D. Bollinger, J. S. McCloy, dan S. Nassiri, "Recycled concrete and brick powders as supplements to Portland cement for more sustainable concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 364, no. June, hal. 132651, Sep 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132651.
- [6] A. Komkova dan G. Habert, "Environmental impact assessment of alkali-activated materials: Examining impacts of variability in constituent production processes and transportation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 363, no. November 2022, hal. 129032, Jan 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129032.
- [7] M. Hou, D. Zhang, dan V. C. Li, "Crack width control and mechanical properties of low carbon engineered cementitious composites (ECC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 348, no. June, hal. 128692, Sep 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128692.
- [8] S. Luo *et al.*, "Microwave preparation and carbonation properties of low-carbon cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, no. November 2021, hal. 126239, Feb 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126239.
- [9] A. Oke, A. Kineber, I. Albukhari, I. Othman, dan C. Kingsley, "Assessment of Cloud Computing Success Factors for Sustainable Construction Industry: The Case of Nigeria," *Buildings*, vol. 11, no. 2, hal. 36, Jan 2021, doi: 10.3390/buildings11020036.
- [10] A. Leemann, F. Winnefeld, B. Münch, dan J. Tiefenthaler, "Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates and its implications for the production of recycling concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 79, no. September, hal. 107779, Nov 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107779.
- [11] M. Koniorczyk, D. Bednarska, A. Masek, dan S. Cichosz, "Performance of concrete containing recycled masks used for personal protection during coronavirus pandemic," *Constr. Build. Mater.*, vol. 324, no. February, hal. 126712, Mar 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126712.
- [12] N. Bheel, P. Awoyera, T. Tafsirojjaman, N. Hamah Sor, dan S. Sohu, "Synergic effect of metakaolin and groundnut shell ash on the behavior of fly ash-based self-compacting geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 311, no. October, hal. 125327, Des 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125327.
- [13] T. A. Aiken, J. Kwasny, W. Sha, dan K. T. Tong, "Mechanical and durability properties of alkali-activated fly ash concrete with increasing slag content," *Constr. Build. Mater.*, vol. 301, no. July, hal. 124330, Sep 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124330.
- [14] L. AbuMoeilak, A. AlQuraidi, A. AlZarooni, dan S. Beheiry, "Critical Success Factors for Building Information Modeling Implementation as a Sustainable Construction Practice in the UAE," *Buildings*, vol. 13, no. 6, hal. 1406, Mei 2023, doi: 10.3390/buildings13061406.
- [15] Z. Mustapha, C. Aigbavboa, dan W. Thwala, "Construction Industry," in *Contractor Health and Safety Compliance for Small to Medium-Sized Construction Companies*, vol. 2014, no. 5–6, Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2017.: CRC Press, 2017, hal. 31–60. doi: 10.1201/b22259-4.
- [16] M. Ma, V. W. Tam, K. N. Le, dan R. Osei-Kyei, "Factors affecting the price of recycled concrete: A critical review," *J. Build. Eng.*, vol. 46, no. November 2021, hal. 103743, Apr 2022, doi: 10.1016/j.job.2021.103743.
- [17] R. Polo-Mendoza, R. Peñabaena-Niebles, F. Giustozzi, dan G. Martinez-Arguelles, "Eco-friendly design of Warm mix asphalt (WMA) with recycled concrete aggregate (RCA): A case study from a developing country," *Constr. Build. Mater.*, vol. 326, hal. 126890, Apr 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126890.
- [18] A. T. Gebremariam *et al.*, "Comprehensive study on the most sustainable concrete design made of recycled concrete, glass and mineral wool from C&D wastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, hal. 121697, Mar 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121697.
- [19] N. Makul *et al.*, "Use of Recycled Concrete Aggregates in Production of Green Cement-Based Concrete Composites: A Review," *Crystals*, vol. 11, no. 3, hal. 232, Feb 2021, doi: 10.3390/cryst11030232.
- [20] A. Ahmad, K. Chaiyasarn, F. Farooq, W. Ahmad, S. Suparp, dan F. Aslam, "Compressive Strength Prediction via Gene Expression Programming (GEP) and Artificial Neural Network (ANN) for Concrete Containing RCA," *Buildings*, vol. 11, no. 8, hal. 324, Jul 2021, doi: 10.3390/buildings11080324.
- [21] Ç. Yalçinkaya dan O. Çopuroğlu, "Hydration heat, strength and microstructure characteristics of UHPC containing blast furnace slag," *J. Build. Eng.*, vol. 34, no. October 2020, hal. 101915, Feb 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101915.
- [22] E. R. Teixeira, A. Camões, dan F. G. Branco, "Synergetic effect of biomass fly ash on improvement of high-volume coal fly ash concrete properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 314, no. November 2021, hal. 125680, Jan 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125680.
- [23] P. Tamayo, G. G. del Angel, J. Setién, A. Soto, dan C. Thomas, "Feasibility of silicomanganese slag as

- cementitious material and as aggregate for concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 364, no. November 2022, hal. 129938, Jan 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129938.
- [24] A. Meena, N. Singh, dan S. P. Singh, “High-volume fly ash Self Consolidating Concrete with coal bottom ash and recycled concrete aggregates: Fresh, mechanical and microstructural properties,” *J. Build. Eng.*, vol. 63, no. PA, hal. 105447, Jan 2023, doi: 10.1016/j.job.2022.105447.
- [25] S. Zhuang, Q. Wang, dan M. Zhang, “Water absorption behaviour of concrete: Novel experimental findings and model characterization,” *J. Build. Eng.*, vol. 53, no. May, hal. 104602, Agu 2022, doi: 10.1016/j.job.2022.104602.
- [26] K. M. Klima, K. Schollbach, H. J. H. Brouwers, dan Q. Yu, “Enhancing the thermal performance of Class F fly ash-based geopolymer by sodalite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 314, no. PA, hal. 125574, Jan 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125574.
- [27] M. Nedeljković, J. Visser, B. Šavija, S. Valcke, dan E. Schlangen, “Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review,” *J. Build. Eng.*, vol. 38, no. May 2020, hal. 102196, Jun 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102196.
- [28] Z. A. Kazmi dan M. Sodangi, “Modeling the Constraints to the Utilization of the Internet of Things in Managing Supply Chains of Off-Site Construction: An Approach toward Sustainable Construction,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, hal. 388, Mar 2022, doi: 10.3390/buildings12030388.
- [29] R. Seager, N. Henderson, dan M. Cane, “Persistent Discrepancies between Observed and Modeled Trends in the Tropical Pacific Ocean,” *J. Clim.*, vol. 35, no. 14, hal. 4571–4584, Jul 2022, doi: 10.1175/JCLI-D-21-0648.1.
- [30] H. Abdalla, K. P. Fattah, M. Abdallah, dan A. K. Tamimi, “Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House,” *Sustainability*, vol. 13, no. 21, hal. 11978, Okt 2021, doi: 10.3390/su132111978.
- [31] Z. Li, X. Liang, Y. Chen, dan G. Ye, “Effect of metakaolin on the autogenous shrinkage of alkali-activated slag-fly ash paste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 278, hal. 122397, Apr 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122397.
- [32] O. Ly *et al.*, “Optimisation of 3D printed concrete for artificial reefs: Biofouling and mechanical analysis,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, hal. 121649, Feb 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121649.
- [33] I. S. Hikouei, K. N. Eshleman, B. H. Saharjo, L. L. B. Graham, G. Applegate, dan M. A. Cochrane, “Using machine learning algorithms to predict groundwater levels in Indonesian tropical peatlands,” *Sci. Total Environ.*, vol. 857, no. September 2022, hal. 159701, Jan 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159701.
- [34] E. De Lombaerde *et al.*, “Maintaining forest cover to enhance temperature buffering under future climate change,” *Sci. Total Environ.*, vol. 810, no. November 2021, hal. 151338, Mar 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151338.
- [35] M. Barkhordari, D. Armaghani, A. Mohammed, dan D. Ulrikh, “Data-Driven Compressive Strength Prediction of Fly Ash Concrete Using Ensemble Learner Algorithms,” *Buildings*, vol. 12, no. 2, hal. 132, Jan 2022, doi: 10.3390/buildings12020132.
- [36] C. Rodrigue Kaze *et al.*, “Characterization and performance evaluation of laterite based geopolymer binder cured at different temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, hal. 121443, Feb 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121443.
- [37] N.-H. Nguyen, T. P. Vo, S. Lee, dan P. G. Asteris, “Heuristic algorithm-based semi-empirical formulas for estimating the compressive strength of the normal and high performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 304, no. September, hal. 124467, Okt 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124467.
- [38] N. Lazzari, M. A. Becerro, J. A. Sanabria-Fernandez, dan B. Martín-López, “Assessing social-ecological vulnerability of coastal systems to fishing and tourism,” *Sci. Total Environ.*, vol. 784, hal. 147078, Agu 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147078.
- [39] N. Bheel *et al.*, “Utilization of corn cob ash as fine aggregate and ground granulated blast furnace slag as cementitious material in concrete,” *Buildings*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/buildings11090422.
- [40] A. S. Alqarni, H. Abbas, K. M. Al-Shwikh, dan Y. A. Al-Salloum, “Treatment of recycled concrete aggregate to enhance concrete performance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 307, no. September, hal. 124960, Nov 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124960.
- [41] E. Cuenca, A. Mezzena, dan L. Ferrara, “Synergy between crystalline admixtures and nano-constituents in enhancing autogenous healing capacity of cementitious composites under cracking and healing cycles in aggressive waters,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 266, hal. 121447, Jan 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121447.
- [42] H. Egodagamage, H. D. Yapa, H. A. D. Samith Buddika, S. Navaratnam, dan K. Nguyen, “Effective use of biochar as an additive for alkali-activated slag mortar production,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 370, no. July 2022, hal. 130487, Mar 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130487.
- [43] V. Quan Tran, V. Quoc Dang, dan L. Si Ho, “Evaluating compressive strength of concrete made with recycled concrete aggregates using machine learning approach,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 323, no. November 2021, hal. 126578, Mar 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126578.
- [44] K. C. Onyelowe *et al.*, “Multi-Objective Optimization of Sustainable Concrete Containing Fly Ash Based on Environmental and Mechanical Considerations,” *Buildings*, vol. 12, no. 7, hal. 948, Jul 2022, doi:

- 10.3390/buildings12070948.
- [45] H. Song *et al.*, "Predicting the compressive strength of concrete with fly ash admixture using machine learning algorithms," *Constr. Build. Mater.*, vol. 308, hal. 125021, Nov 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125021.
- [46] Y. Peng dan C. Unluer, "Analyzing the mechanical performance of fly ash-based geopolymer concrete with different machine learning techniques," *Constr. Build. Mater.*, vol. 316, no. November 2021, hal. 125785, Jan 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125785.
- [47] S. Arogundade, M. Dulaimi, dan S. Ajayi, "Holistic Review of Construction Process Carbon-Reduction Measures: A Systematic Literature Review Approach," *Buildings*, vol. 13, no. 7, hal. 1780, Jul 2023, doi: 10.3390/buildings13071780.
- [48] E. Pawluczuk, K. Kalinowska-Wichrowska, J. R. Jiménez, J. M. Fernández-Rodríguez, dan D. Suescum-Morales, "Geopolymer concrete with treated recycled aggregates: Macro and microstructural behavior," *J. Build. Eng.*, vol. 44, hal. 103317, Des 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103317.
- [49] W. Zhou, W. Yu, Z. Zhang, W. Cao, dan T. Wu, "How can urban green spaces be planned to mitigate urban heat island effect under different climatic backgrounds? A threshold-based perspective," *Sci. Total Environ.*, vol. 890, no. May, hal. 164422, Sep 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164422.
- [50] M. Chen, H. Si, X. Fan, Y. Xuan, dan M. Zhang, "Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 316, no. November 2021, hal. 125896, Jan 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125896.
- [51] N. Omoding, L. S. Cunningham, dan G. F. Lane-Serff, "Effect of using recycled waste glass coarse aggregates on the hydrodynamic abrasion resistance of concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, hal. 121177, Jan 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121177.
- [52] W. Emad *et al.*, "Metamodel techniques to estimate the compressive strength of UHPFRC using various mix proportions and a high range of curing temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 349, no. May, hal. 128737, Sep 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128737.
- [53] E. Chuvieco, M. L. Pettinari, N. Koutsias, M. Forkel, S. Hantson, dan M. Turco, "Human and climate drivers of global biomass burning variability," *Sci. Total Environ.*, vol. 779, hal. 146361, Jul 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146361.
- [54] V. Revilla-Cuesta, L. Evangelista, J. de Brito, M. Skaf, dan V. Ortega-López, "Mechanical performance and autogenous and drying shrinkage of MgO-based recycled aggregate high-performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 314, hal. 125726, Jan 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125726.
- [55] J.-M. Bonmatin *et al.*, "Residues of neonicotinoids in soil, water and people's hair: A case study from three agricultural regions of the Philippines," *Sci. Total Environ.*, vol. 757, hal. 143822, Feb 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143822.
- [56] S. D. Datta, M. H. R. Sobuz, A. S. M. Akid, dan S. Islam, "Influence of coarse aggregate size and content on the properties of recycled aggregate concrete using non-destructive testing methods," *J. Build. Eng.*, vol. 61, no. September, hal. 105249, Des 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105249.