

Performa Mekanik dan Laju Penyerapan Air Mortar Ramah Lingkungan dengan Penggunaan *Ultrafine Palm Oil Fuel Ash* (POFA)

Amry Dasar^{1*}, Dahlia Patah¹, Herni Suryani¹, Risma Nofianti Idris¹, Ibrahim Djamaluddin², Apriansyah¹

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Selawesi Barat

²Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

*Email:dahlia.patah@gmail.com

Abstract

This study aims to evaluate the effect of using ultrafine Palm Oil Fuel Ash (UPOFA) and ground Palm Oil Fuel Ash (GPOFA) as partial cement replacements on the compressive strength and sorptivity (water absorption rate) of eco-friendly mortar. Five mortar mix variations were prepared, consisting of a control mix (normal mortar), mixes containing 10–30% UPOFA, and one mix with 20% GPOFA, all designed with a water-to-cement ratio (w/c) of 0.40. Compressive strength tests were conducted at 7, 28, and 56 days, while sorptivity was measured at 28 days in accordance with ASTM C1585. The results showed that incorporating 10% UPOFA yielded the best performance, achieving a compressive strength of 32.93 MPa and the lowest sorptivity value, indicating enhanced microstructural density due to active pozzolanic reactions. In contrast, the mix with 20% GPOFA exhibited the poorest performance, attributed to its coarser particle size and lower pozzolanic reactivity. Mortars with 20–30% UPOFA showed a decrease in compressive strength, likely due to an imbalance between the amount of fine particles and the availability of water for hydration. These findings suggest that the optimal use of UPOFA can significantly improve both the mechanical properties and resistance to water ingress in mortar. Furthermore, its appropriate application supports the advancement of sustainable construction materials. Given the abundant availability of palm oil biomass waste in tropical regions, POFA holds strong potential for wider adoption in environmentally friendly concrete construction.

Keywordsx: Eco-friendly concrete, UPOFA, Compressive strength, Sorptivity, Pozzolanic reaction

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan *ultrafine Palm Oil Fuel Ash* (UPOFA) dan *ground Palm Oil Fuel Ash* (GPOFA) sebagai bahan substitusi sebagian semen terhadap kuat tekan dan laju penyerapan air (sorptivity) pada mortar ramah lingkungan. Disiapkan lima variasi campuran mortar, terdiri dari mortar normal sebagai kontrol, mortar dengan 10–30% UPOFA, dan mortar dengan 20% GPOFA, semua menggunakan faktor air-semen (FAS) 40%. Kuat tekan di uji pada umur 7, 28, dan 56 hari, sedangkan sorptivity diuji pada umur 28 hari sesuai standar ASTM C1585. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan 10% UPOFA memberikan performa terbaik, dengan kuat tekan 32,93 MPa dan nilai sorptivity terendah, yang mencerminkan peningkatan densitas mikrostruktur akibat reaksi pozzolan aktif. Sebaliknya, penggunaan 20% GPOFA menghasilkan performa terendah, disebabkan oleh ukuran partikel yang kasar dan rendah reaktivitas pozzolan. Penggunaan UPOFA dalam kadar 20–30% menunjukkan penurunan kuat tekan, yang mungkin disebabkan oleh ketidakseimbangan antara jumlah material halus dan ketersediaan air untuk reaksi hidrasi.. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan UPOFA dalam dosis yang tepat dapat meningkatkan kinerja mekanik dan ketahanan mortar terhadap penetrasi air. Selain itu, penggunaan UPOFA dalam dosis yang tepat akan mendorong pengembangan material konstruksi yang berkelanjutan. POFA dapat digunakan secara lebih luas dalam konstruksi beton, khususnya di daerah tropis di mana limbah biomassa sawit sangat melimpah.

Kata kunci: Beton ramah lingkungan, UPOFA, Kuat tekan, Laju penyerapan air, Reaksi pozzolan

1. Pendahuluan

Salah satu parameter penting yang menentukan masa layan struktur bangunan adalah durabilitas beton. Struktur beton bertulang yang terekspos langsung oleh lingkungan agresif, seperti infrastruktur laut (dermaga, pemecah gelombang, tanggul laut, tiang pancang jembatan, sheet pile beton bertulang, hingga menara pantai) memerlukan ketahanan tinggi terhadap penetrasi air untuk mencegah terjadinya korosi pada baja tulangan. Proses elektrokimia yang sangat dipengaruhi oleh kehadiran air dan oksigen dalam pori-pori beton menyebabkan korosi. Oleh karena itu, sifat mikrostruktur dan tingkat permeabilitasnya sangat menentukan ketahanan beton terhadap korosi [1].

Permeabilitas adalah ukuran kemampuan fluida untuk menembus mikrostruktur beton. Beton dengan permeabilitas tinggi memudahkan masuknya senyawa agresif seperti ion klorida, sulfat, dan zat alkali yang dapat mengganggu kestabilan kimia beton. [2]. Sebaliknya, beton dengan permeabilitas rendah lebih tahan terhadap air dan zat kimia dari lingkungan eksternal [3]. Salah satu metode untuk menilai potensi kerusakan akibat penetrasi air adalah pengukuran laju penyerapan air, yang juga dikenal sebagai sorptivitas, yang mengurangi kemampuan beton kapiler untuk menyerap air. [4]. Pengujian sorptivity adalah cara cepat dan mudah untuk menunjukkan awal kapasitas pengangkutan air melalui sistem pori beton. Komposisi bahan penyusun beton, terutama karakteristik matriks semen dan distribusi pori mempengaruhi nilai sorptivitas. [4]. Meskipun pengujian ini tidak memberikan informasi tentang kedalaman penetrasi air, temuan tersebut dapat digunakan sebagai kriteria utama untuk mengevaluasi kinerja ketahanan beton, terutama dalam kondisi yang keras dan basah. [5].

Salah satu cara untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton adalah dengan mengubah komposisi material penyusunnya. Salah satu cara adalah dengan menggunakan *mineral admixture* sebagai pengganti sebagian

semen. Penggunaan *mineral admixture* terbukti dapat meningkatkan kinerja mekanik dan ketahanan beton sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan yang disebabkan oleh produksi semen konvensional [6][7][8][9][10]. Salah satu *mineral admixture* yang potensial adalah *Palm Oil Fuel Ash* (POFA), khususnya dalam bentuk *ultrafine Palm Oil Fuel Ash* (UPOFA) dan *ground Palm Oil Fuel Ash* (GPOFA). POFA adalah bahan pozzolan karena memiliki kandungan silika reaktif yang tinggi dan dibuat dari limbah padat dari industri kelapa sawit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan POFA sebagai pengganti semen meningkatkan kekuatan mekanik, menurunkan permeabilitas beton, dan meningkatkan struktur mikro beton. [11][12][13].

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan kadar POFA memengaruhi sifat mekanik dan laju penyerapan air pada mortar. Tiga kadar UPOFA (10%, 20%, dan 30%) dan satu kadar GPOFA (20%) digunakan sebagai pengganti sebagian semen. Mortar biasa tanpa POFA digunakan sebagai benda uji kontrol. Diharapkan penelitian ini akan membantu mengembangkan mortar ramah lingkungan dengan performa mekanik dan durabilitas yang unggul. Ini akan dilakukan melalui pengujian kuat tekan dan laju penyerapan air untuk setiap variasi campuran.

2. Metoda Penelitian

2.1. Material

(1) Semen dan POFA

Semen Portland Komposit (PCC) sesuai dengan standar SNI 15-7064-2004, dengan berat jenis $3,08 \text{ g/cm}^3$, adalah jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini. Sebagian semen diganti dengan POFA. POFA yang digunakan didapatkan dari limbah pembakaran pabrik kelapa sawit yang berlokasi di Mamju Tengah, Sulawesi Barat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Raw POFA

POFA yang telah dikumpulkan melalui proses pembakaran di-treatment sebelum digunakan. Perlakuan termal awal pada POFA dilakukan dengan cara dikeringkan dalam oven pada suhu $105 \pm 5^\circ\text{C}$ selama 20–24 jam untuk menghilangkan kadar air. POFA disaring selepas pengeringan dengan saringan No.50 untuk memisahkan partikel kasar. Proses ini menghasilkan GPOFA. GPOFA selanjutnya digiling dengan mesin *disc mill* pada kecepatan 8800 rpm dan hasilnya disaring kembali dengan saringan No.300 untuk mendapatkan partikel sangat halus yang disebut UPOFA.

Berat jenis GPOFA dan UPOFA masing-masing sebesar 2,39 dan 2,63 g/cm³. Densitas yang lebih tinggi ini menunjukkan bahwa proses penggilingan halus memberikan efek pengisian pori (*filler effect*) yang lebih baik, meningkatkan kerapatan mikrostruktur mortar, dan mengurangi porositas. Tabel 1 menyajikan komposisi kimia PCC, GPOFA, dan UPOFA yang diperoleh melalui analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF). Gambar 2 memperlihatkan morfologi partikel dari ketiga material itu.

Tabel 1. Komposisi kimia (%) dari PCC, GPOFA dan UPOFA

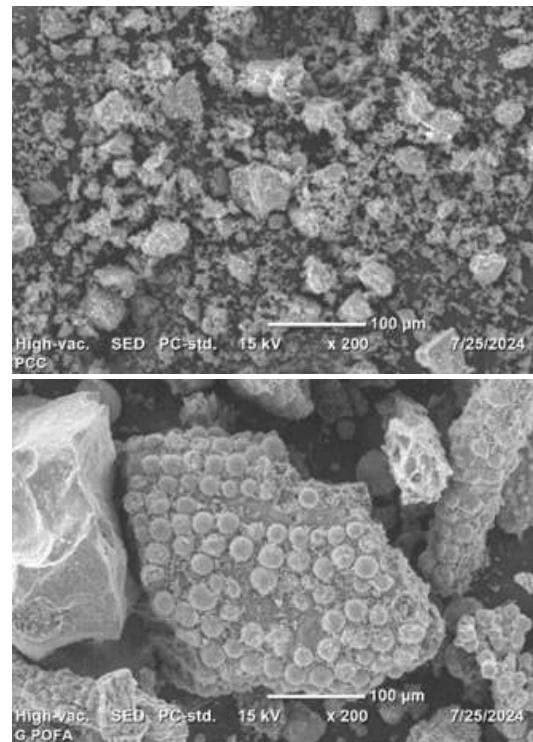
Material	PCC	GPOFA	UPOFA
SiO ₂	24.62	56.58	67.59
CaO	53.31	8.61	7.35
SO ₃	7.534	5.95	2.76
Al ₂ O ₃	6.463	2.01	2.83
Fe ₂ O ₃	2.139	1.49	1.71
K ₂ O	0.53	11.62	7.01
Na ₂ O	3.57	1.66	2.61
MgO	1.823	12.19	8.13

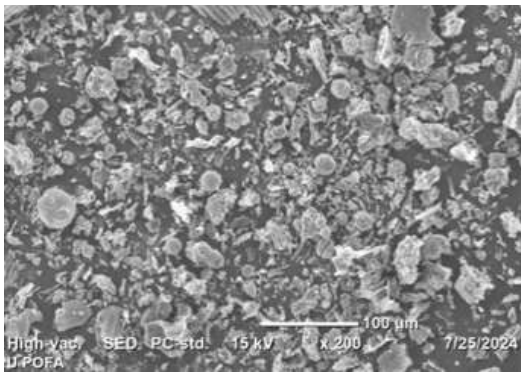
(2) Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan adalah pasir Sungai Mappili, Polewali, Sulawesi Barat, dengan ukuran maksimum 4,75 mm sesuai batas standar agregat halus. Pasir dicuci dan digunakan dalam keadaan *Saturated Surface Dry* (SSD) untuk menjaga konsistensi kadar air sebelum digunakan. Berat jenis pasir Sungai yang digunakan 2,36. Selain itu, nilai berat isi, kandungan kelembaban dan daya serap air pasir masing-masing sebesar 1462 kg/m³, 3,40%, dan 1,92%.

(3) Air

Air tawar dari sumur bor Laboratorium Teknik Sipil digunakan untuk pencampur dan perawatan. Proses pencampuran mortar dan perendaman benda uji selama perawatan menggunakan air ini.





Gambar 2. Morfologi partikel dari PCC, GPOFA dan UPOFA

2.2. Pembuatan Benda Uji

Penelitian ini menggunakan lima variasi campuran mortar yaitu satu campuran kontrol (tanpa POFA), satu variasi GPOFA 20%, dan tiga variasi UPOFA 10%, 20%, dan 30% terhadap berat semen. Umumnya, penelitian mortar ini menggunakan konsistensi kepadatan sedang yaitu menggunakan faktor air semen (FAS) sebesar 40%. Tabel 2 menyajikan komposisi campuran untuk setiap variasi. Sebagaimana dirinci pada Tabel 3, sebanyak 60 benda uji berbentuk kubus $5 \times 5 \times 5$ cm dibuat untuk pengujian kuat tekan dan laju penyerapan air.

Tabel 2. Proporsi campuran mortar (kg/m^3)

Material	N- RS- TW	GP20- RS- TW	UP10- RS- TW	UP20- RS- TW	UP30- RS- TW
PCC (kg/m^3)	580	464	522	464	406
GPOFA (kg/m^3)	0	116	0	0	0
UPOFA (kg/m^3)	0	0	58	116	174
River Sand (kg/m^3)	1223	1208	1221	1219	1217
Tap Water (kg/m^3)	232	232	232	232	232

Tabel 3. Jumlah benda uji

Material	N- RS- TW	GP20- RS- TW	UP10- RS- TW	UP20- RS- TW	UP30- RS- TW
Kuat tekan	9	9	9	9	9
Laju penyerapan air	3	3	3	3	3

Proses pencampuran dimulai dengan mencampur kering bahan-bahan (semen/PCC, GPOFA/UPOFA, pasir) selama 5 menit. Sebanyak 50% air kemudian ditambahkan

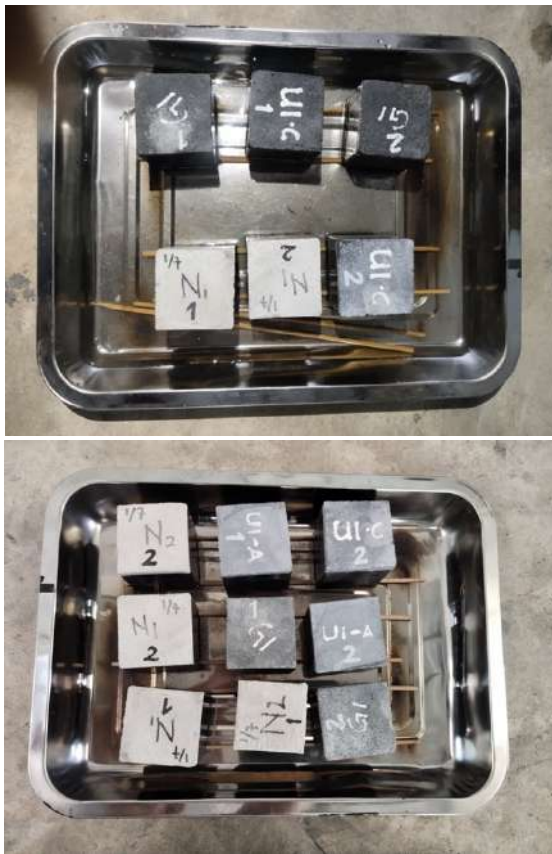
secara bertahap dan diaduk selama 3 menit. Sisa air kemudian ditambahkan dan pencampuran dilanjutkan selama 5 menit sampai campuran homogen. Mortar segar dituangkan ke dalam cetakan kubus yang diolesi minyak. Pemadatan dilaksanakan dengan menggunakan batang pemadat berdiameter 16 mm dan dilanjutkan dengan vibrasi mekanis selama 1 menit. Setelah itu, cetakan ditutup dengan plastik film selama 20–24 jam untuk menghindari evaporasi. Benda uji kemudian direndam dalam air tawar sampai umur uji (7, 28, dan 56 hari).

2.3. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai standar ASTM C109/C109M-21 menggunakan benda uji berukuran $5 \times 5 \times 5$ cm. Testmax C3228 dengan kapasitas 3000 kN dan laju pembebanan 140 kN/menit digunakan untuk menguji pada umur 7, 28, dan 56 hari. Tiga benda uji dirata-ratakan per variasi.

2.4. Pengujian Laju Penyerapan Air

Uji laju penyerapan air dilaksanakan pada umur 28 hari sesuai standar ASTM C1585-20. Selama 3 hari, benda uji dikondisikan dalam ruang bersuhu 50 ± 2 °C dengan kelembaban relatif $80 \pm 3\%$, kemudian disimpan di ruang tertutup bersuhu 23 ± 2 °C selama 15 hari sampai mencapai kondisi semi-kering. Selama pengujian, seluruh permukaan benda uji dilapisi epoxy kecuali sisi bawah, untuk memastikan air hanya masuk dari satu arah. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, benda uji diletakkan di atas penyangga kayu dengan bagian bawah menyentuh permukaan air setinggi 1–3 mm. Berat benda uji dicatat secara berkala pada menit ke 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, dan 360, yang mencakup fase awal penyerapan. Nilai sorptivity dihitung dengan Persamaan (1).



Gambar 3. Uji laju penyerapan air

$$I = \frac{m_t}{a \cdot d} \quad (1)$$

Dimana:

I = penyerapan air kumulatif (mm)

m_t = perubahan massa spesimen pada waktu tertentu (g)

a = luas bidang permukaan spesimen yang bersentuhan langsung dengan air (mm²)

d = densitas air, yaitu 1 g/cm³.

3. Hasil Penelitian

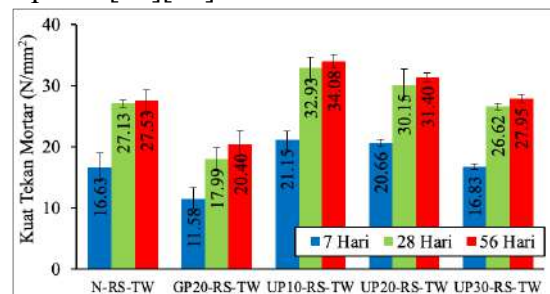
3.1. Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan mortar pada umur 7, 28, dan 56 hari ditampilkan pada Gambar 4. Setiap variasi campuran menunjukkan peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya waktu perawatan. Pada umur 28 hari, campuran kontrol (N-RS-TW) mempunyai kuat tekan 27,13 MPa dan meningkat menjadi 27,53 MPa pada umur 56 hari. Campuran 10% UPOFA menunjukkan peningkatan paling ketara, yang mencapai kuat

tekan 34,08 MPa pada umur 56 hari. Nilai ini menunjukkan peningkatan sebesar 23,8% dari benda uji kontrol. Peningkatan ini dikarenakan dengan reaksi pozzolan antara kandungan silika (SiO₂) tinggi dalam UPOFA dan Ca(OH)₂ hasil hidrasi semen, yang menghasilkan pembentukan gel *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) sekunder memperkuat struktur matriks mortar [14].

Sebaliknya, pada variasi 20% GPOFA, kuat tekan tercatat sebesar 20,40 MPa pada umur 56 hari, nilai yang lebih rendah dibandingkan seluruh variasi UPOFA. Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel GPOFA yang lebih kasar, sehingga perannya lebih sebagai pengisi fisik daripada berkontribusi dalam reaksi pozzolanik aktif [14][15]. Pada variasi 20% UPOFA dan 30% UPOFA, terdapat penurunan bertahap kuat tekan, masing-masing menjadi 31,40 MPa dan 27,95 MPa pada umur 56 hari.

Penurunan ini dapat disebabkan oleh kelebihan kandungan UPOFA yang mengurangi ketersediaan Ca(OH)₂ bebas serta peningkatan kebutuhan air karena luas permukaan UPOFA yang tinggi. Jika tidak diimbangi dengan penambahan air pencampur, hal ini dapat menyebabkan hidrasi tidak sempurna dan terbentuknya pori-pori yang tidak terisi sempurna [16] [17]. Namun, seluruh variasi UPOFA menunjukkan performa lebih baik dibandingkan GPOFA. Walaupun demikian, seluruh variasi UPOFA menunjukkan performa kuat tekan yang lebih baik dibandingkan GPOFA. Hal ini disebabkan oleh luas permukaan spesifik UPOFA yang lebih tinggi, distribusi partikel yang lebih halus, serta kemampuan reaktifitas yang lebih baik dalam membentuk struktur mikro yang rapat dan padat [15][16].

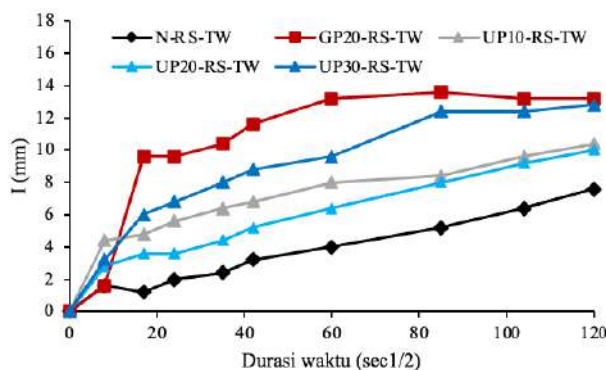


Gambar 4. Kuat tekan mortar umur 7, 28 dan 56 hari

3.2. Laju Penyerapan Air

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara waktu dan laju penyerapan air selama 28 hari. Laju penyerapan air menunjukkan kemampuan mortar untuk menyerap air melalui pori-pori kapiler. Laju penyerapan air adalah indikator penting untuk mengevaluasi ketahanan mortar terhadap penetrasi air dan gangguan lingkungan yang berbahaya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi 20% GPOFA memiliki nilai penyerapan air tertinggi, dengan kedalaman penetrasi lebih dari 14 mm pada waktu 120 detik^{1/2}. Ukuran partikel GPOFA yang kecil dan reaktivitas pozzolan yang rendah mungkin menjadi alasan mengapa mereka tidak dapat membentuk mikrostruktur yang rapat [18].

Sebaliknya, dari seluruh variasi, termasuk kontrol, campuran 10% UPOFA menunjukkan nilai penyerapan air paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa jika digunakan dalam kadar yang optimum, UPOFA dapat mengisi pori mikro dalam mortar dan memperbaiki struktur antarmuka pasta-semen. Kandungan SiO₂ yang tinggi dan ukuran partikel yang sangat halus dari UPOFA memungkinkan reaksi pozzolan aktif dan pembentukan gel C-S-H yang efektif untuk menyumbat jalur kapiler [18].



Gambar 5. Hubungan antara durasi waktu terhadap laju penyerapan air

Namun, peningkatan kadar UPOFA menjadi 20% dan 30% menunjukkan bahwa laju penyerapan air telah meningkat. Kelebihan UPOFA yang tidak bereaksi selama perawatan diduga menyebabkan reaksi pozzolan yang tidak sepenuhnya.

Selain itu, kelebihan partikel halus meningkatkan permintaan air, atau kebutuhan air, dan dapat menyebabkan pembentukan pori-pori tidak terisi sempurna, meningkatkan permeabilitas [19].

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa jika *Ultrafine Palm Oil Fuel Ash* (UPOFA) digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran mortar, itu dapat meningkatkan performa mekanik dan ketahanan terhadap penetrasi air secara signifikan. Dengan menggunakan 10% UPOFA, kuat tekan tertinggi dan laju penyerapan air terendah dihasilkan. Ini menunjukkan kemampuan UPOFA dalam memperbaiki mikrostruktur mortar melalui reaksi pozzolan yang membentuk gel C-S-H sekunder.

Sebaliknya, penggunaan 20% GPOFA dan UPOFA dalam kadar antara 20% dan 30% memberikan hasil yang kurang optimal. Material halus yang tidak seluruhnya bereaksi dapat menghasilkan porositas yang lebih besar dan kekompakan struktur yang lebih lemah. Namun, setiap variasi UPOFA tetap lebih baik daripada GPOFA. Oleh karena itu, untuk memaksimalkan kontribusi material pengganti terhadap kekuatan dan durabilitas beton, adalah penting untuk menemukan proporsi terbaik. Untuk menghasilkan mortar dan beton yang ramah lingkungan dengan masa layan yang lebih panjang, substitusi sebagian semen dengan UPOFA dalam dosis yang tepat dapat menjadi metode yang efektif dan berkelanjutan.

5. Saran

Disarankan untuk menggunakan UPOFA sebagai pengganti sebagian semen. Penelitian selanjutnya harus melihat reaksi POFA jangka panjang, khususnya pada variasi dengan kadar yang lebih tinggi. Penelitian selanjutnya harus melihat durasi perawatan yang lebih panjang, seperti 180 hari, untuk melihat proporsi ideal, yaitu 10%, untuk meningkatkan kuat tekan dan ketahanan terhadap penetrasi air.

6. Daftar Pustaka

- [1] S. P. Zhang and L. Zong, "Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1155/2014/650373.
- [2] V. A. Okumu, S. M. Shitote, and W. O. Oyawa, "Influence of Constituent Materials Properties on the Compressive Strength of in Situ Concrete in Kenya," *Open J. Civ. Eng.*, vol. 07, no. 01, pp. 63–81, 2017, doi: 10.4236/ojce.2017.71004.
- [3] "Effects of Curing Conditions and Age on Chloride Permeability of Fly Ash Mortar," *ACI Mater. J.*, vol. 93, no. 1, 1996, doi: 10.14359/9800.
- [4] W. Kubissa, R. Jaskulski, P. Koteš, and M. Brodňan, "Variability of Sorptivity in the Concrete Element According to the Method of Compacting," *Procedia Eng.*, vol. 153, pp. 355–360, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.127.
- [5] W. J. McCarter, H. Ezirim, and M. Emerson, "Absorption of water and chloride into concrete," *Mag. Concr. Res.*, vol. 44, no. 158, pp. 31–37, Mar. 1992, doi: 10.1680/mac.1992.44.158.31.
- [6] R. Zhong and K. Wille, "Material design and characterization of high performance pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 51–60, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027.
- [7] N. M. Noor, H. Y. Yusaini, D. Patah, A. Dasar, and R. Irmawaty, "The Effect of Utilising Coal Ash as Substitutes for Cement and Sand on Compressive Strength and Water Permeability of Concrete," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1453, no. 1, p. 012006, Feb. 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1453/1/012006.
- [8] D. Patah, A. Dasar, and N. Md. Noor, "The Effects of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical and Durability Properties of Sustainable Foamed Concrete," *J. Civ. Eng. Forum*, pp. 75–84, Jan. 2025, doi: 10.22146/jcef.13749.
- [9] D. Patah, A. Dasar, F. Fakhruddin, B. Shintarahayu, and A. Apriansyah, "The Impact of Fly Ash and Sea Sand on Strength and Durability of Concrete," *Key Eng. Mater.*, vol. 1000, pp. 23–33, Dec. 2024, doi: 10.4028/p-o0WA24.
- [10] D. Patah and A. Dasar, "The Impact of using Rice Husks Ash, Seawater and Sea Sand on Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete," *J. Civ. Eng. Forum*, pp. 251–262, Jul. 2023, doi: 10.22146/jcef.6016.
- [11] D. Patah, A. Dasar, and A. Nurdin, "Sustainable concrete using seawater, sea-sand, and ultrafine palm oil fuel ash: Mechanical properties and durability," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04129, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04129.
- [12] A. Dasar and D. Patah, "Kekuatan dan Durabilitas Beton Menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Pasir Pantai," *Borneo Eng. J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 83–94, Apr. 2024, doi: 10.35334/be.v8i1.5090.
- [13] A. Dasar, D. Patah, M. A. Caronge, F. Mahmuddin, and A. Apriansyah, "Strength and Durability of Paving Block with Seawater and POFA (Palm Oil Fuel Ash)," *Key Eng. Mater.*, vol. 1000, pp. 11–22, Dec. 2024, doi: 10.4028/p-K6EQUo.
- [14] M. A. Megat Johari, A. M. Zeyad, N. Muhamad Bunnori, and K. S. Ariffin, "Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 281–288, May 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.007.
- [15] H. Hamada, B. Tayeh, F. Yahaya, K. Muthusamy, and A. Al-Attar, "Effects of nano-palm oil fuel ash and nano-eggshell powder on concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 261, p. 119790, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119790.
- [16] H. M. Hamada, A. A. Al-attar, F. M. Yahaya, K. Muthusamy, B. A. Tayeh, and A. M. Humada, "Effect of high-volume

- ultrafine palm oil fuel ash on the engineering and transport properties of concrete,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 12, p. e00318, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00318.
- [17] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and P. Chindapasirt, “Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2641–2646, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008.
- [18] D. Hatungimana, C. Taşköprü, M. İçhedef, M. M. Saç, and Ş. Yazıcı, “Compressive strength, water absorption, water sorptivity and surface radon exhalation rate of silica fume and fly ash based mortar,” *J. Build. Eng.*, vol. 23, pp. 369–376, May 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.01.011.
- [19] G. J. P. Ghewa, P. Suprobo, D. Irawan, S. Wahyuniarsih, and T. Asdam, “Investigation of Water Absorption for Concrete Using Supplementary Materials,” *IPTEK J. Technol. Sci.*, vol. 31, no. 3, p. 309, Nov. 2020, doi: 10.12962/j20882033.v31i3.5596.