

Pengaruh Variasi Kadar dan Ukuran Butiran Palm Oil Fuel Ash (POFA) terhadap Kuat Tekan dan Berat Isi Mortar Busa

Doni Rinaldi Basri^{1*}, Muhammad Yazid², Riski Nando Pratama³, Abi Wahyudi⁴

^{1,2,3,4}Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Abdurrah, Jl. Riau Ujung No. 73 Pekanbaru Riau

^{*}doni.rinaldi@univrab.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan limbah Palm Oil Fuel Ash (POFA) sebagai material substitusi pada mortar busa menjadi alternatif dalam pengembangan material konstruksi ringan berbasis limbah agroindustri. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi kadar dan ukuran butiran POFA terhadap kuat tekan serta berat isi mortar busa. Penelitian menggunakan desain kuantitatif eksperimental laboratorium. Material penyusun terdiri atas semen PCC, pasir Sungai Kampar, air sumur bor Kampus I Universitas Abdurrah, agen foam nabati SMA CON, dan POFA sebagai material substitusi. Variasi kadar POFA adalah 0%, 10%, 20%, dan 30%, sedangkan fraksi ukuran nominal yang dibandingkan adalah 1,18 mm (saringan No. 16) dan 0,60 mm (saringan No. 30). Pengujian dilakukan pada umur 7 dan 14 hari sehingga hasil penelitian merepresentasikan performa umur awal mortar busa. Data dianalisis secara deskriptif-komparatif melalui perbandingan nilai rata-rata, perubahan terhadap campuran kontrol, serta rasio kuat tekan terhadap berat isi. Hasil menunjukkan bahwa pada umur 7 hari, kuat tekan tertinggi diperoleh pada campuran 30% POFA ukuran 0,60 mm (No. 30), sedangkan pada umur 14 hari kuat tekan tertinggi diperoleh pada campuran kontrol tanpa POFA. Berat isi terendah diperoleh pada campuran 20% POFA ukuran 1,18 mm (No. 16) umur 7 hari. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan POFA berkaitan dengan perubahan kuat tekan dan berat isi mortar busa, tetapi pola perubahannya tidak linier. Secara praktis, POFA berpotensi dimanfaatkan sebagai material substitusi mortar busa, namun penerapannya memerlukan optimasi kadar, ukuran butiran, dan umur rencana agar diperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanis dan karakter ringan material.

Kata Kunci: Palm Oil Fuel Ash; POFA; mortar busa; kuat tekan; berat isi; material ringan.

1. Pendahuluan

Kebutuhan terhadap material konstruksi yang lebih ringan, efisien, dan berkelanjutan semakin meningkat seiring berkembangnya tuntutan pengurangan dampak lingkungan pada sektor konstruksi. Produksi semen memiliki kontribusi emisi yang signifikan karena memerlukan proses pembakaran klinker dan energi panas tinggi. Data industri semen menunjukkan bahwa intensitas emisi sejak 2018 relatif stabil pada kisaran sedikit di bawah 0,6 ton CO₂ per ton semen yang diproduksi [1]. Kondisi ini mendorong pengembangan material alternatif melalui substitusi sebagian bahan konvensional dengan material limbah yang memiliki potensi teknis.

Salah satu limbah agroindustri yang relevan dikembangkan adalah Palm Oil Fuel Ash (POFA), yaitu abu hasil pembakaran biomassa kelapa sawit. Relevansi POFA sangat kuat di

Indonesia karena kelapa sawit merupakan salah satu komoditas perkebunan utama. Data statistik nasional memuat luas areal dan produksi komoditas perkebunan tahunan unggulan, termasuk kelapa sawit, menurut provinsi [2]. Pada tingkat regional, statistik kelapa sawit Provinsi Riau juga menunjukkan pentingnya pengelolaan limbah hasil pengolahan sawit secara produktif [3].

POFA berpotensi digunakan dalam material berbasis semen karena dapat bekerja melalui mekanisme reaksi pozzolanik dan efek pengisian pori. Reaksi pozzolanik berkaitan dengan kemampuan material kaya silika untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen dan membentuk produk tambahan yang memperkuat matriks. Sementara itu, efek pengisian pori terjadi ketika partikel halus mengisi rongga mikro dalam campuran, sehingga struktur internal menjadi lebih padat. Karakteristik POFA, seperti jenis abu, tingkat penggilingan, perlakuan panas, komposisi fisik-kimia, dan ukuran partikel, dilaporkan memengaruhi sifat beton maupun mortar berbasis semen [4]-[7].

Dalam mortar busa, persoalan teknis tidak hanya terletak pada kuat tekan, tetapi juga pada berat isi. Mortar busa mempunyai rongga udara yang dibentuk oleh foam agent sehingga berat isinya lebih rendah dibandingkan mortar konvensional. Akan tetapi, struktur berpori tersebut dapat menurunkan kuat tekan apabila komposisi campuran tidak dikendalikan. Oleh karena itu, formulasi mortar busa perlu diarahkan untuk mencapai keseimbangan antara karakter ringan dan kekuatan mekanis yang memadai [8].

Penelitian mengenai mortar busa telah berkembang dengan mengkaji berbagai karakteristik material penyusunnya. Salah satu penelitian menunjukkan bahwa gradasi pasir berpengaruh terhadap pemanfaatan mortar busa sebagai material pengganti lapisan pondasi jalan pada tanah gambut [9]. Penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa variasi gradasi pasir dapat memengaruhi berat isi dan kuat tekan pavement foam mortar [10]. Temuan tersebut memperlihatkan bahwa karakteristik fisik material penyusun memiliki peran penting terhadap performa mortar busa. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada gradasi pasir, penelitian ini mengkaji pengaruh kadar dan ukuran butiran POFA terhadap kuat tekan dan berat isi mortar busa.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan POFA pada beton busa ringan dan mortar tidak selalu menghasilkan peningkatan kekuatan secara linier. Penggunaan POFA sebagai material substitusi semen pada lightweight foamed concrete dengan kadar 10%, 20%, dan 30% menunjukkan bahwa kadar tertentu dapat memberikan performa yang lebih baik dibandingkan penggunaan pada kadar yang lebih tinggi [11]. Selain itu, kadar optimum POFA pada beton busa berkelanjutan dipengaruhi oleh rasio foaming agent dan karakteristik campuran [12]. Pengecilan ukuran partikel POFA juga dilaporkan dapat meningkatkan reaktivitas pozzolanik dan kekuatan mortar [13]. Di sisi lain, penggunaan POFA dalam kadar tinggi pada material berbasis semen tetap memerlukan optimasi komposisi agar karakteristik dan performa teknis material dapat dipertahankan [14].

Berdasarkan kajian tersebut, gap penelitian ini terletak pada masih terbatasnya studi yang secara simultan membandingkan kadar POFA, fraksi ukuran nominal POFA, umur pengujian, kuat tekan, dan berat isi pada mortar busa. Penelitian ini menggunakan campuran kontrol 0% POFA serta campuran substitusi 10%, 20%, dan 30% POFA dengan dua fraksi ukuran nominal, yaitu 1,18 mm (saringan No. 16) dan 0,60 mm (saringan No. 30), pada umur pengujian 7 dan 14 hari. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kecenderungan perubahan kuat tekan dan berat isi mortar busa akibat variasi kadar dan ukuran POFA, serta mengidentifikasi campuran yang menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanis dan karakter ringan pada umur awal.

2. Metodologi

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif komparatif. Desain ini dipilih karena penelitian menguji pengaruh perlakuan

material berupa variasi kadar POFA dan ukuran butiran POFA terhadap respons terukur, yaitu kuat tekan dan berat isi mortar busa. Analisis diarahkan untuk membandingkan nilai rata-rata pada setiap variasi campuran.

2.2 Material Penelitian

Tabel 1. Material penelitian

No	Material	Keterangan
1	Semen	Semen PCC
2	Pasir	Pasir Sungai Kampar
3	Air	Air sumur bor Universitas Abdurrah
4	Foam agent	Foam agent nabati SMA CON
5	POFA	Fraksi ukuran nominal 1,18 mm (saringan No. 16) dan 0,60 mm (saringan No. 30)

Sumber: Data primer pengujian mortar busa POFA.

POFA dalam penelitian ini digunakan sebagai material substitusi sebagian pasir dan dibedakan berdasarkan dua fraksi ukuran nominal yang dinyatakan berdasarkan bukaan saringan, yaitu 1,18 mm (saringan No. 16) dan 0,60 mm (saringan No. 30). Istilah ukuran POFA pada seluruh naskah merujuk pada ukuran bukaan saringan tersebut, bukan pada diameter rata-rata partikel. Informasi sumber spesifik POFA, metode penghalusan sebelum pengayakan, berat jenis, komposisi kimia, dan *loss on ignition* (LOI) belum terdokumentasi dalam dataset yang digunakan untuk penyusunan naskah ini. Oleh karena itu, pembahasan mengenai mekanisme pozzolanik dan filler effect diposisikan sebagai interpretasi yang didukung literatur dan belum merupakan mekanisme yang dikonfirmasi melalui karakterisasi langsung POFA yang digunakan.

2.3 Variabel dan Rancangan Eksperimen

Tabel 2. Variabel penelitian

No	Jenis Variabel	Variabel	Variasi/Indikator	Satuan
1	Variabel bebas	Kadar POFA	0%, 10%, 20%, 30%	%
2	Variabel bebas	Ukuran butiran POFA	1,18 mm (No. 16), 0,60 mm (No. 30)	mm/nomor saringan
3	Faktor pembanding	Umur pengujian	7 hari dan 14 hari	hari
4	Variabel terikat	Kuat tekan	Nilai kuat tekan rata-rata	kPa
5	Variabel terikat	Berat isi	Massa per volume benda uji	t/m ³

Sumber: Rancangan penelitian, 2026.

Rancangan eksperimen terdiri atas satu campuran kontrol tanpa POFA (0%) dan enam campuran dengan POFA, yaitu kombinasi tiga kadar substitusi (10%, 20%, dan 30%) dengan dua fraksi ukuran nominal POFA [1,18 mm (No. 16) dan 0,60 mm (No. 30)], yang diuji pada umur 7 dan 14 hari. Karena campuran kontrol tidak mengandung POFA, faktor ukuran butiran tidak berlaku pada kontrol. Nilai kontrol yang sama ditampilkan kembali pada masing-masing kelompok ukuran hanya untuk memudahkan perbandingan visual dan perhitungan perubahan terhadap kontrol.

2.4 Pembuatan dan Pengujian Benda Uji

Benda uji dibuat dengan mencampurkan semen PCC, pasir, air, POFA sesuai variasi, dan foam agent untuk membentuk mortar busa. Benda uji berbentuk silinder dengan tinggi sekitar 20 cm dan diameter sekitar 9,80-10,00 cm. Setelah dicetak, benda uji dirawat hingga umur pengujian 7 dan 14 hari. Rentang umur tersebut digunakan untuk mengevaluasi performa

umur awal dan belum dimaksudkan untuk merepresentasikan perkembangan reaksi pozzolanik POFA pada umur lanjut.

Sebelum pengujian dilakukan, dimensi dan massa setiap benda uji dicatat sebagai dasar dalam perhitungan kuat tekan dan berat isi. Nilai kuat tekan diperoleh dari perbandingan antara beban maksimum yang diterima benda uji dan luas penampang tekan, kemudian dinyatakan secara konsisten dalam satuan kPa. Pengujian kuat tekan mengacu pada ASTM C495/C495M [15], pengujian bahan pembusa merujuk pada ASTM C796/C796M [16], sedangkan penentuan berat isi didasarkan pada prinsip pengukuran densitas atau unit weight sesuai ASTM C138/C138M [17].

2.5 Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif-komparatif melalui perbandingan nilai rata-rata yang tersedia, persentase perubahan terhadap kontrol, perbandingan antarfraksi ukuran POFA, dan rasio kuat tekan terhadap berat isi. Data individual setiap replikasi benda uji tidak terdokumentasi secara lengkap dan konsisten untuk seluruh variasi, sehingga jumlah replikasi (n) dan simpangan baku dalam kelompok tidak dapat dilaporkan secara andal. Oleh karena itu, naskah ini tidak melakukan uji signifikansi statistik dan tidak menyimpulkan adanya pengaruh yang signifikan secara statistik. Hasil dibaca sebagai kecenderungan deskriptif pada kombinasi campuran yang diuji, sedangkan ANOVA faktorial atau analisis inferensial lain direkomendasikan setelah data replikasi lengkap tersedia.

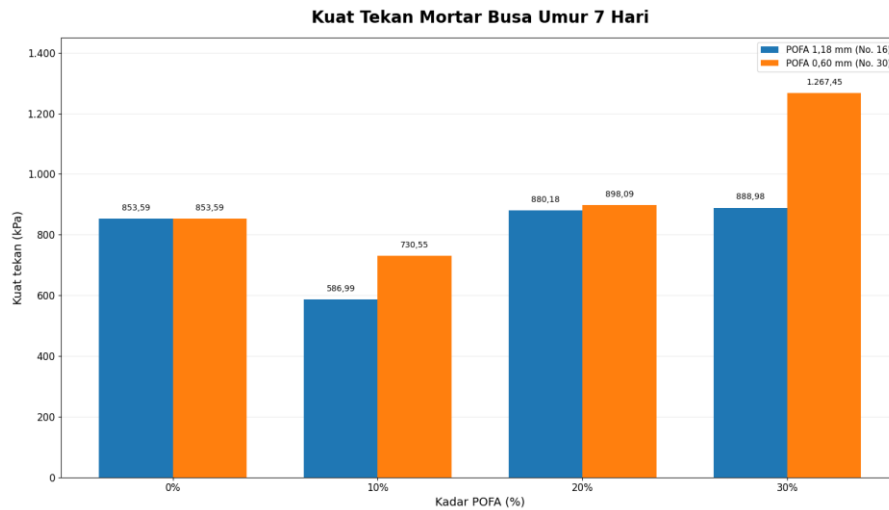
3. Hasil dan Pembahasan

Bagian hasil menyajikan nilai rata-rata kuat tekan dan berat isi yang tersedia berdasarkan kadar POFA, fraksi ukuran nominal, dan umur pengujian. Seluruh nilai kuat tekan disajikan dalam kPa dan berat isi dalam t/m^3 . Penyebutan ukuran POFA diseragamkan menjadi 1,18 mm (saringan No. 16) dan 0,60 mm (saringan No. 30). Untuk campuran kontrol 0% POFA, nilai yang sama ditampilkan pada kedua kelompok ukuran hanya sebagai referensi perbandingan karena kontrol tidak memiliki faktor ukuran POFA.

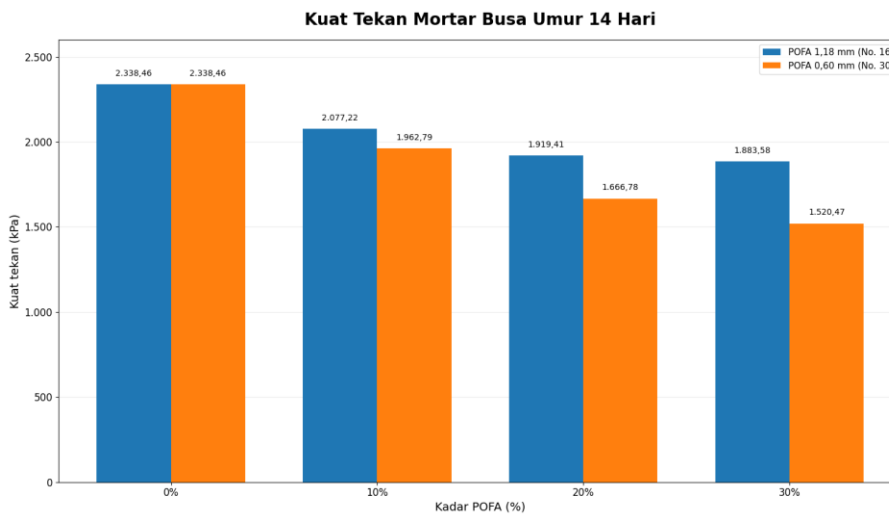
Tabel 3. Rata-rata kuat tekan mortar busa (kPa)

Umur	Ukuran POFA	0% POFA	10% POFA	20% POFA	30% POFA
7 hari	1,18 mm (No. 16)	853,59	586,99	880,18	888,98
7 hari	0,60 mm (No. 30)	853,59	730,55	898,09	1.267,45
14 hari	1,18 mm (No. 16)	2.338,46	2.077,22	1.919,41	1.883,58
14 hari	0,60 mm (No. 30)	2.338,46	1.962,79	1.666,78	1.520,47

Sumber: Data primer pengujian mortar busa POFA.



Gambar 1. Grafik kuat tekan mortar busa umur 7 hari



Gambar 2. Grafik kuat tekan mortar busa umur 14 hari

Tabel 4. Perubahan kuat tekan terhadap kontrol 0% POFA

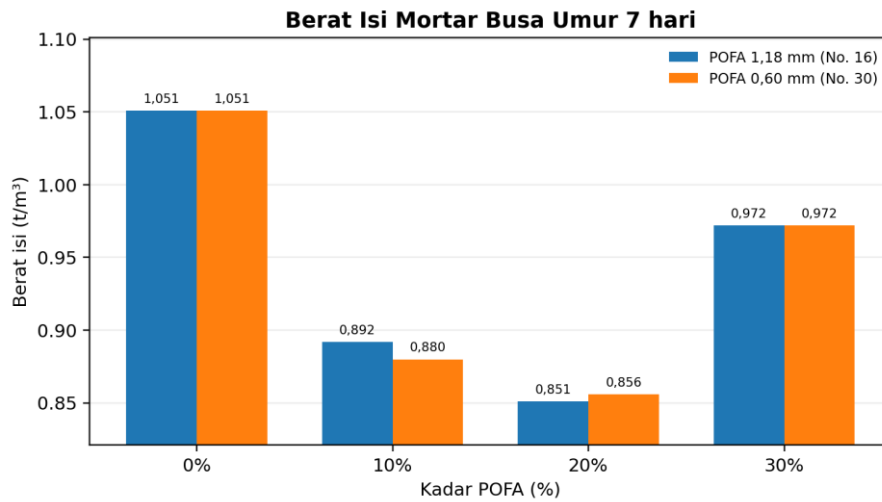
Umur	Ukuran POFA	10% POFA	20% POFA	30% POFA
7 hari	1,18 mm (No. 16)	-31,23%	+3,11%	+4,15%
7 hari	0,60 mm (No. 30)	-14,41%	+5,21%	+48,49%
14 hari	1,18 mm (No. 16)	-11,17%	-17,92%	-19,45%
14 hari	0,60 mm (No. 30)	-16,06%	-28,72%	-34,98%

Sumber: Hasil olah data, 2026.

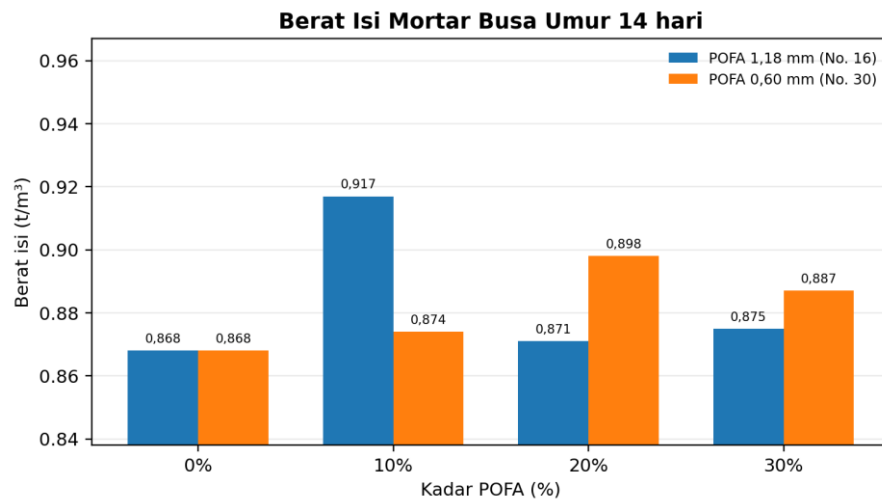
Tabel 5. Berat isi mortar busa (t/m³)

Umur	Ukuran POFA	0% POFA	10% POFA	20% POFA	30% POFA
7 hari	1,18 mm (No. 16)	1,051	0,892	0,851	0,972
7 hari	0,60 mm (No. 30)	1,051	0,880	0,856	0,972
14 hari	1,18 mm (No. 16)	0,868	0,917	0,871	0,875
14 hari	0,60 mm (No. 30)	0,868	0,874	0,898	0,887

Sumber: Data primer pengujian mortar busa POFA.



Gambar 3. Grafik berat isi mortar busa umur 7 hari



Gambar 4. Grafik berat isi mortar busa umur 14 hari

Tabel 6. Perubahan berat isi terhadap kontrol 0% POFA

Umur	Ukuran POFA	10% POFA	20% POFA	30% POFA
7 hari	1,18 mm (No. 16)	-15,13%	-19,03%	-7,52%
7 hari	0,60 mm (No. 30)	-16,27%	-18,55%	-7,52%
14 hari	1,18 mm (No. 16)	+5,65%	+0,35%	+0,81%
14 hari	0,60 mm (No. 30)	+0,69%	+3,46%	+2,19%

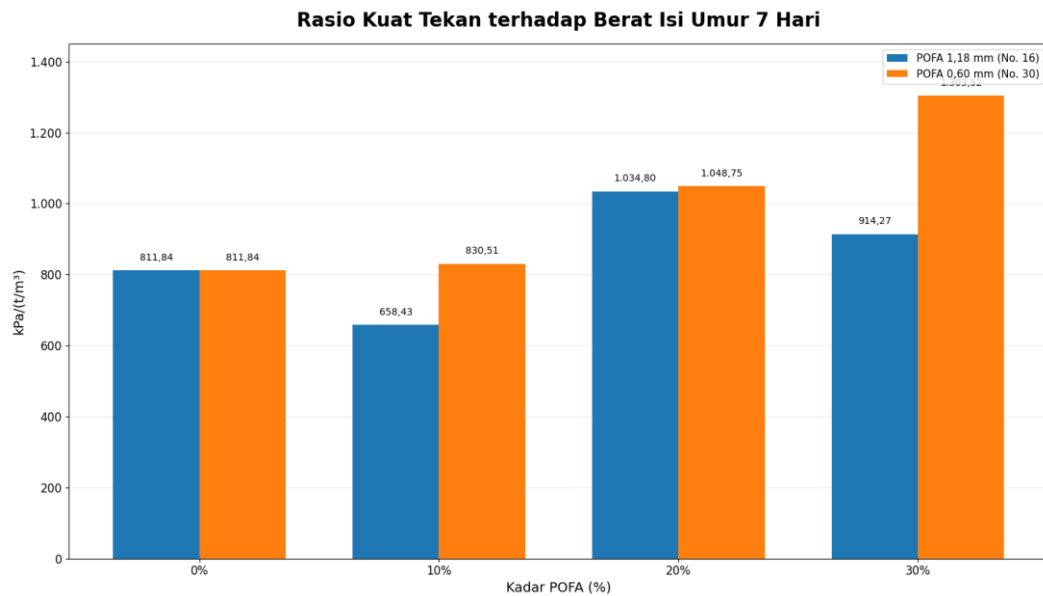
Sumber: Hasil olah data, 2026.

Tabel 7. Rasio kuat tekan terhadap berat isi [kPa/(t/m³)]

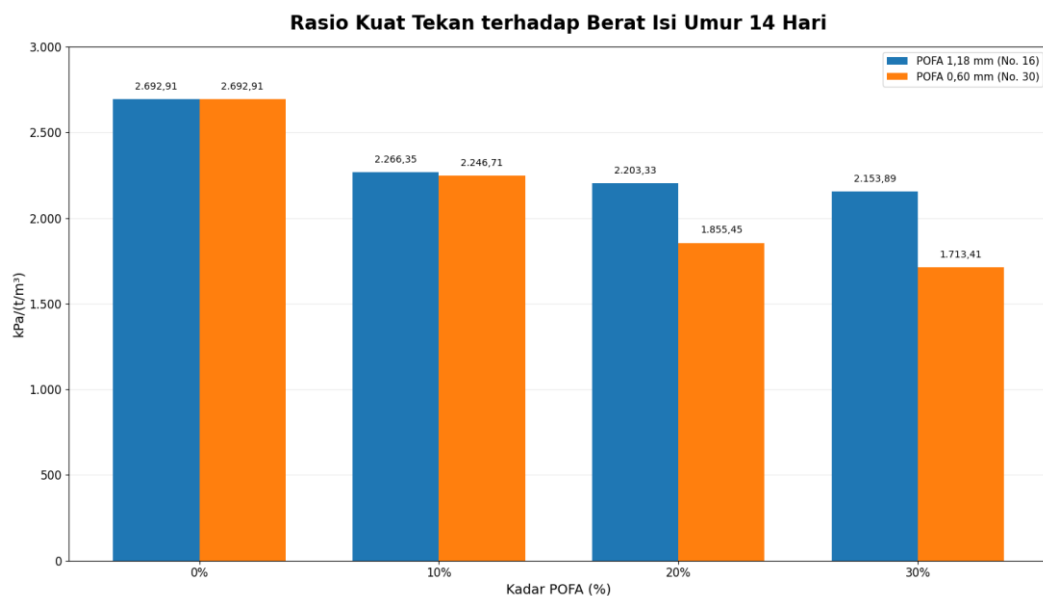
Umur	Ukuran POFA	0% POFA	10% POFA	20% POFA	30% POFA
7 hari	1,18 mm (No. 16)	811,84	658,43	1.034,80	914,27
7 hari	0,60 mm (No. 30)	811,84	830,51	1.048,75	1.303,52
14 hari	1,18 mm (No. 16)	2.692,91	2.266,35	2.203,33	2.153,89
14 hari	0,60 mm (No. 30)	2.692,91	2.246,71	1.855,45	1.713,41

Sumber: Hasil olah data, 2026.

Rasio kuat tekan terhadap berat isi digunakan sebagai indikator komparatif internal untuk menilai keseimbangan antara kapasitas tekan dan karakter ringan material; rasio ini bukan parameter material yang distandardisasi. Pada umur 7 hari, rasio tertinggi diperoleh pada campuran 30% POFA ukuran 0,60 mm (No. 30), sedangkan pada umur 14 hari rasio tertinggi diperoleh pada campuran kontrol 0% POFA.



Gambar 5. Rasio kuat tekan terhadap berat isi umur 7 hari



Gambar 6. Rasio kuat tekan terhadap berat isi umur 14 hari

Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan kecenderungan kuat tekan dan berat isi pada variasi kadar dan fraksi ukuran nominal POFA yang diuji. Karena data replikasi individual tidak lengkap, perbedaan tersebut dibahas secara deskriptif dan tidak ditafsirkan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik. Pada umur 7 hari, POFA 0,60 mm (No. 30) menghasilkan nilai kuat tekan lebih tinggi daripada POFA 1,18 mm (No. 16) pada kadar 10%, 20%, dan 30%. Pola ini dapat dikaitkan dengan kemungkinan filler effect sebagaimana

dilaporkan dalam literatur, yaitu partikel yang lebih halus berpotensi membantu pengisian rongga dan meningkatkan kepadatan lokal [13]. Namun, karena distribusi ukuran partikel dan mikrostruktur POFA tidak diuji secara langsung, mekanisme tersebut belum dapat dikonfirmasi pada material penelitian ini.

Pada umur 14 hari, pola kuat tekan berubah. Campuran kontrol 0% POFA menghasilkan kuat tekan tertinggi, sedangkan nilai kuat tekan campuran dengan POFA cenderung menurun seiring peningkatan kadar. Secara teoritis, pola tersebut dapat berkaitan dengan dilution effect ketika peningkatan kadar substitusi mengurangi proporsi pasir aktif sebelum kontribusi reaksi sekunder berkembang optimal. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa kadar POFA yang terlalu tinggi dapat menurunkan performa lightweight foamed concrete dan bahwa karakter POFA, termasuk porositas serta *loss on ignition*, turut memengaruhi respons material [11]. Karena parameter tersebut tidak dikarakterisasi dalam penelitian ini, penjelasan dilution effect digunakan sebagai interpretasi berbasis literatur, bukan pembuktian mekanisme.

Perbandingan antara POFA 1,18 mm (No. 16) dan 0,60 mm (No. 30) juga menunjukkan bahwa fraksi ukuran nominal perlu dibaca bersama dengan kadar dan umur pengujian. POFA 0,60 mm (No. 30) memberikan nilai kuat tekan lebih tinggi pada umur 7 hari, tetapi pada umur 14 hari POFA 1,18 mm (No. 16) menunjukkan nilai lebih tinggi pada kadar 10%, 20%, dan 30%. Perubahan pola ini mengindikasikan adanya interaksi kompleks antara komposisi padatan dan struktur pori mortar busa, tetapi penyebab spesifiknya belum dapat dipastikan tanpa data kebutuhan air, distribusi pori, distribusi ukuran partikel, serta karakterisasi kimia-mineralogi POFA.

Dari sisi berat isi, penggunaan POFA pada kadar 10% dan 20% menurunkan berat isi umur 7 hari dibandingkan kontrol berdasarkan nilai rata-rata yang tersedia. Berat isi terendah diperoleh pada campuran 20% POFA ukuran 1,18 mm (No. 16). Pada kadar 30%, berat isi meningkat kembali dibandingkan kadar 20%, sehingga penambahan POFA tidak menunjukkan hubungan linier dengan karakter ringan mortar. Perubahan tersebut dapat berkaitan dengan distribusi partikel, volume pori, dan stabilitas busa, tetapi faktor-faktor tersebut belum diukur secara langsung dalam penelitian ini.

Hubungan kuat tekan dan berat isi memperlihatkan bahwa campuran dengan nilai kuat tekan tertinggi tidak selalu memiliki berat isi terendah. Pada umur 7 hari, campuran 30% POFA ukuran 0,60 mm (No. 30) memiliki kuat tekan dan rasio kuat tekan terhadap berat isi tertinggi, tetapi bukan berat isi terendah. Sementara itu, campuran 20% POFA ukuran 1,18 mm (No. 16) memiliki berat isi terendah, tetapi bukan kuat tekan tertinggi. Oleh karena itu, pemilihan komposisi perlu disesuaikan dengan target penggunaan, apakah menekankan kuat tekan awal, berat isi rendah, atau keseimbangan keduanya.

Hasil deskriptif penelitian ini melengkapi temuan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa karakter material pengisi berkaitan dengan berat isi dan kuat tekan mortar busa [9], [10]. Penelitian sebelumnya menekankan pengaruh gradasi pasir, sedangkan penelitian ini menunjukkan bahwa kadar substitusi dan fraksi ukuran nominal POFA juga layak dipertimbangkan dalam pengendalian performa mortar busa. Meskipun demikian, generalisasi hasil perlu dibatasi karena penelitian ini hanya mencakup umur 7 dan 14 hari serta belum didukung data replikasi lengkap dan karakterisasi POFA secara langsung.

Secara teoritis, pola hasil penelitian konsisten dengan kemungkinan kontribusi mekanisme fisik dan kimia POFA yang telah dilaporkan dalam literatur, tetapi penelitian ini belum mengukur mekanisme tersebut secara langsung. Secara praktis, campuran 30% POFA ukuran 0,60 mm (No. 30) menunjukkan kuat tekan awal tertinggi pada umur 7 hari, sedangkan campuran 20% POFA ukuran 1,18 mm (No. 16) menunjukkan berat isi terendah pada umur yang sama. Kedua temuan tersebut harus dipahami sebagai hasil spesifik pada campuran dan umur yang diuji, bukan sebagai komposisi optimum universal.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, umur pengujian hanya mencakup 7 dan 14 hari, sehingga hasil hanya merepresentasikan performa umur awal dan belum cukup untuk mengevaluasi kontribusi pozzolanik POFA pada umur lanjut. Kedua, data individual replikasi benda uji tidak terdokumentasi lengkap untuk seluruh variasi, sehingga analisis

inferensial dan simpangan baku dalam kelompok tidak dapat dilaporkan secara andal. Ketiga, karakteristik sumber dan preparasi POFA belum terdokumentasi secara rinci, serta belum tersedia pengujian berat jenis, distribusi ukuran partikel, XRF, XRD, SEM, loss on ignition, porositas, dan absorpsi air. Penelitian lanjutan perlu melengkapi data replikasi, melakukan karakterisasi POFA, dan memperpanjang umur pengujian hingga 28, 56, dan 90 hari agar perkembangan performa jangka menengah dan jangka panjang dapat dievaluasi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis deskriptif pada data yang tersedia, variasi kadar dan fraksi ukuran nominal POFA berkaitan dengan perubahan kuat tekan dan berat isi mortar busa, tetapi pola perubahannya tidak linier. Pada umur 7 hari, POFA ukuran 0,60 mm (No. 30) menunjukkan kecenderungan kuat tekan lebih tinggi daripada POFA 1,18 mm (No. 16), terutama pada kadar 30%. Pada umur 14 hari, campuran kontrol tanpa POFA menghasilkan kuat tekan tertinggi, sedangkan nilai campuran dengan POFA cenderung menurun seiring peningkatan kadar.

Pada parameter berat isi, penggunaan POFA pada kadar 10% dan 20% menurunkan berat isi mortar busa pada umur 7 hari dibandingkan kontrol berdasarkan nilai rata-rata yang tersedia. Berat isi terendah diperoleh pada campuran 20% POFA ukuran 1,18 mm (No. 16). Pada kadar 30%, berat isi meningkat kembali dibandingkan kadar 20%, sehingga peningkatan kadar POFA tidak selalu menghasilkan mortar yang lebih ringan.

Secara teoritis, hasil penelitian dapat dikaitkan dengan mekanisme filler effect dan dilution effect yang dilaporkan dalam literatur, tetapi mekanisme tersebut belum dapat dikonfirmasi secara langsung karena karakterisasi kimia, mineralogi, distribusi ukuran partikel, dan mikrostruktur POFA tidak dilakukan. Dengan demikian, interpretasi mekanisme pada penelitian ini bersifat tentatif dan perlu diverifikasi melalui pengujian lanjutan.

Secara praktis, POFA berpotensi dimanfaatkan sebagai material substitusi dalam mortar busa. Untuk performa umur 7 hari pada campuran yang diuji, 30% POFA ukuran 0,60 mm (No. 30) memberikan kuat tekan tertinggi, sedangkan 20% POFA ukuran 1,18 mm (No. 16) memberikan berat isi terendah. Namun, pada umur 14 hari campuran kontrol tanpa POFA masih menunjukkan kuat tekan tertinggi. Oleh karena itu, penentuan kadar optimum belum dapat disimpulkan secara definitif hanya dari umur 7 dan 14 hari.

Kesimpulan penelitian ini dibatasi pada kecenderungan deskriptif dan performa umur awal karena data replikasi individual belum lengkap dan umur pengujian hanya 7 serta 14 hari. Penelitian lanjutan disarankan untuk melengkapi data replikasi pada setiap variasi, memperpanjang umur pengujian hingga 28, 56, dan 90 hari, serta melakukan pengujian berat jenis, distribusi ukuran partikel, XRF, XRD, SEM, loss on ignition, porositas, absorpsi air, dan durabilitas. Dengan data tersebut, pengaruh kadar, ukuran, dan umur dapat dianalisis secara inferensial dan hubungan antara karakteristik POFA dengan performa mortar busa dapat dijelaskan secara lebih komprehensif.

Referensi

- [1] International Energy Agency, "Cement," IEA, 2024.
- [2] Badan Pusat Statistik, Indonesian Permanent Estate Crops Statistics 2024: Palm Oil, Coffee, Cocoa, Rubber, Tea, and Strategic Estate Crops Commodities. Badan Pusat Statistik, 2025.
- [3] Badan Pusat Statistik Provinsi Riau, Statistik Kelapa Sawit Provinsi Riau 2024. Badan Pusat Statistik Provinsi Riau, 2026.
- [4] A. N. B. Mohd Sufian, M. R. Rahman, K. A. B. Mohamad Said, and M. K. B. Bakri, "A critical review of various types of palm oil fuel ash (POFA) utilization in enhancing concrete and

- mortar properties," J. Build. Pathol. Rehabil., vol. 10, Art. no. 124, 2025, doi: 10.1007/s41024-025-00622-8.
- [5] M. Amran, G. Murali, R. Fediuk, N. Vatin, Y. Vasilev, and H. Abdelgader, "Palm oil fuel ash-based eco-efficient concrete: A critical review of the short-term properties," Materials, vol. 14, no. 2, Art. no. 332, 2021, doi: 10.3390/ma14020332.
- [6] R. J. Shaladi, M. A. M. Johari, Z. A. Ahmad, and M. J. A. Mijarsh, "The influence of palm oil fuel ash heat treatment on the strength activity, porosity, and water absorption of cement mortar," Environ. Sci. Pollut. Res., vol. 29, pp. 72493-72514, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-20710-3.
- [7] S. M. Siregar, S. Humaidi, N. Bukit, and E. Frida, "Palm oil fuel ash and fly ash for a partial replacement of cement in high-quality, environmentally friendly mortar as a solution to industrial waste," Sci. Technol. Indonesia, vol. 9, no. 1, pp. 59-68, 2024, doi: 10.26554/sti.2024.9.1.59-68.
- [8] American Concrete Institute, ACI PRC-523.3-14, Guide for Cellular Concretes Above 50 lb/ft³ (800 kg/m³). Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, 2014. [Online]. Available: <https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=523314>
- [9] D. R. Basri, E. E. Putri, B. M. Adj, and A. Hakam, "Pengaruh gradasi pasir pada pemanfaatan mortar busa sebagai pengganti lapisan pondasi jalan pada tanah gambut," Siklus: Jurnal Teknik Sipil, vol. 10, no. 2, 2024, doi: 10.31849/siklus.v10i2.22654.
- [10] D. R. Basri, E. E. Putri, B. M. Adj, and A. Hakam, "Influence of sand gradation on volumetric weigh and compressive strength of pavement foam mortar," Civ. Environ. Eng., vol. 20, no. 2, pp. 654-663, 2024, doi: 10.2478/cee-2024-0049.
- [11] A. M. Alnahhal, U. J. Alengaram, S. Yusoff, R. Singh, M. K. H. Radwan, and W. Deboucha, "Synthesis of sustainable lightweight foamed concrete using palm oil fuel ash as a cement replacement material," J. Build. Eng., vol. 35, Art. no. 102047, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102047.
- [12] D. Patah, A. Dasar, and N. M. Noor, "The effects of palm oil fuel ash on mechanical and durability properties of sustainable foamed concrete," J. Civ. Eng. Forum, vol. 11, no. 1, pp. 79-88, 2025, doi: 10.22146/jcef.13749.
- [13] Y. X. Liew, S. A. Saad, N. Anand, K. F. Tee, and S. C. Chin, "Evaluating the impact of reducing POFA's particle fineness on its pozzolanic reactivity and mortar strength," J. Mater. Sci.: Mater. in Eng., vol. 19, Art. no. 23, 2024, doi: 10.1186/s40712-024-00169-5.
- [14] B. Alsubari, P. Shafigh, and M. Z. Jumaat, "Self-compacting concrete containing high volume palm oil fuel ash," Sustain. Build., vol. 7, Art. no. 8, 2022, doi: 10.1051/sbuild/2022008.
- [15] ASTM International, ASTM C495/C495M-12(2019), Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019.
- [16] ASTM International, ASTM C796/C796M-19, Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019.
- [17] ASTM International, ASTM C138/C138M-17, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017. [Online]. Available: https://store.astm.org/c0138_c0138m-17.html