



Pengaruh Modulus Kehalusan Agregat Halus terhadap Kuat Tekan Mortar Busa

Aditya Wicaksono^{1*}, Firdaus¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains Teknologi, Universitas Bina Darma, Indonesia

Corresponding Author's e-mail: adityawck@gmail.com

Article History:

Received: September 1, 2026

Revised: September 12, 2026

Accepted: September 30, 2026

Keywords:

Foam Mortar, Fineness Modulus, Unconfined Compressive Strength, Interfacial Transition Zone, Lightweight Fill

Abstract: Foam mortar is a lightweight construction material widely used as embankment fill on low-bearing-capacity soil to minimize settlement. This study examines the effect of varying the Fineness Modulus (FM) of fine aggregates on the fresh properties and mechanical performance—specifically Unconfined Compressive Strength (UCS)—of foam mortar. The FM variations tested were FM-1 (2.022), FM-2 (2.431), FM-3 (2.858), and FM-4 (3.050). Tests on the fresh mixture yielded flow values ranging from 18.35 to 18.90 cm and wet densities between 0.740 and 0.752 g/cm³. Physical and mechanical testing at 28 days resulted in dry densities ranging from 0.766 to 0.805 g/cm³ and UCS values between 1,890.00 and 2,891.99 kPa. Quantitatively, the obtained flow values and dry densities demonstrate that the material meets the technical criteria for lightweight fill under specification SKh-2.7.21:2024. Increasing the fine aggregate FM value was shown to significantly enhance UCS due to the formation of a robust particle skeleton without compromising the stability of the foam voids. The study recommends using fine aggregates with a minimum FM of 2.43 to ensure the achievement of the target 28-day UCS of $\geq 2,000$ kPa.

Copyright © 2026, The Author(s).

This is an open access article under the CC-BY-SA license



How to cite: Wicaksono, A., & Firdaus, F. (2026). Pengaruh Modulus Kehalusan Agregat Halus terhadap Kuat Tekan Mortar Busa. *SENTRI: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(9), 4707–4723. <https://doi.org/10.55681/sentri.v5i9.7233>

PENDAHULUAN

Pembangunan jalan pada tanah dengan daya dukung rendah memerlukan material timbunan yang mampu mengurangi beban terhadap tanah dasar. Salah satu material yang dapat digunakan adalah mortar busa. Mortar busa merupakan material ringan yang tersusun atas semen, air, agregat halus, dan *foam agent*. Pembentukan gelembung udara di dalam campuran menghasilkan struktur berpori sehingga berat material menjadi lebih rendah dibandingkan material konvensional. Karakteristik tersebut menjadikan mortar busa dapat digunakan sebagai material timbunan ringan pada pekerjaan jalan dan aplikasi geoteknik lainnya.

Penggunaan mortar busa dalam konstruksi berkaitan dengan kemampuan material dalam menghasilkan berat isi rendah sekaligus kuat tekan yang sesuai dengan kebutuhan pekerjaan. (Fu et al., 2020) menjelaskan bahwa *foam concrete* memiliki potensi sebagai material alternatif karena dapat mengurangi beban mati dan telah digunakan dalam berbagai aplikasi konstruksi. (Shill et al., 2024) juga menunjukkan bahwa kandungan dan konsentrasi busa berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanik material, termasuk karakteristik kuat tekan.

Selain semen, air, dan *foam agent*, agregat halus merupakan komponen penting dalam mortar busa. Perubahan karakteristik agregat dapat memengaruhi susunan partikel dan volume rongga dalam campuran. (Liu et al., 2022) menunjukkan bahwa perubahan rasio pasir terhadap semen memengaruhi sifat mekanik *foam concrete*. (Zhang et al., 2022) juga menemukan bahwa perubahan kandungan material halus dan densitas dapat memengaruhi sifat mekanik *foamed concrete*, termasuk kuat tekan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik agregat perlu diperhatikan dalam perancangan mortar busa.

Salah satu parameter yang dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan ukuran butir agregat halus adalah modulus kehalusan (*Fineness Modulus*/FM). Nilai FM diperoleh dari distribusi ukuran butir berdasarkan analisis saringan. Nilai FM yang lebih rendah menunjukkan kecenderungan agregat yang lebih halus, sedangkan nilai FM yang lebih tinggi menunjukkan kecenderungan agregat yang lebih kasar. Perubahan distribusi ukuran butir dapat memengaruhi susunan antarpartikel, rongga antarbutir, kebutuhan pasta, dan interaksi antara agregat dengan pasta semen.

Pembangunan infrastruktur jalan di atas tanah lunak berdaya dukung rendah menghadapi tantangan utama berupa konsolidasi berlebih dan penurunan diferensial (*differential settlement*). Penggunaan teknologi material ringan seperti mortar busa (*foam mortar*) menjadi solusi rekayasa geoteknik yang sangat efisien untuk mereduksi beban mati struktur di atas tanah dasar. Mortar busa dibentuk dari campuran semen, air, agregat halus, dan busa terstabilisasi (*pre-formed foam*) yang membentuk struktur selular tertutup. Kinerja mekanis dan kestabilan volume material ini ditentukan oleh spesifikasi teknis, salah satunya Spesifikasi Khusus Bina Marga SKh-2.7.21:2024 yang mensyaratkan kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength / UCS*) minimal 2.000 kPa pada umur 28 hari untuk timbunan ringan jalan.

Secara mikrostruktural, kinerja mortar busa sangat dipengaruhi oleh fenomena antarmuka (*Interfacial Transition Zone / ITZ*) yang terbentuk antara matriks pasta semen, dinding gelembung busa (*bubble film*), dan permukaan partikel agregat halus. Berdasarkan teori *particle packing*, khususnya pendekatan *Compressible Packing Model (CPM)*, distribusi ukuran butir agregat menentukan kerapatan kerangka matriks dan retensi air bebas dalam campuran segar. Partikel agregat halus yang sangat halus memiliki luas permukaan spesifik (*specific surface area*) yang sangat tinggi, sehingga menyerap porsi air bebas yang signifikan untuk pembasahan awal (*wetting requirement*). Hal ini dapat meningkatkan porositas kapiler pada ITZ dan memicu penyatuan gelembung (*foam bubble coalescence*) akibat distorsi tegangan permukaan film busa. Sebaliknya, agregat dengan distribusi butir yang lebih kasar (FM tinggi) mampu membentuk *skeleton packing* yang efisien, meminimalkan kebutuhan pembasahan air bebas, serta menjaga integritas dinding selular busa. Oleh karena itu, pemahaman komprehensif mengenai kontribusi Modulus Kehalusan (FM) agregat halus terhadap perkembangan UCS dan densitas kering menjadi sangat krusial.

Penelitian mengenai hubungan modulus kehalusan dan kuat tekan menunjukkan hasil yang belum sepenuhnya konsisten. (Gilang Dimalouw & Saelan, 2016) melakukan penelitian terhadap variasi modulus kehalusan pasir dan mendapatkan bahwa perubahan modulus kehalusan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan beton pada kondisi penelitian mereka. Sementara itu, penelitian Pada mortar busa, penelitian (Tisnawan et al., 2023) menunjukkan bahwa perbedaan jenis *foaming agent* menghasilkan perbedaan nilai kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength/UCS*), berat isi, dan *flow*.

Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa karakteristik campuran mortar busa sangat dipengaruhi oleh komponen penyusunnya. (Basri et al., 2024) secara lebih khusus mengkaji gradasi pasir pada pemanfaatan mortar busa sebagai pengganti lapisan pondasi jalan pada tanah gambut. Penelitian tersebut menggunakan kriteria kuat tekan lebih dari 2.000 kPa untuk aplikasi sebagai lapisan pondasi dan menunjukkan bahwa pasir dengan gradasi lebih halus masih dapat digunakan dalam pembuatan mortar busa.

Target kuat tekan 2.000 kPa dalam penelitian ini ditetapkan berdasarkan spesifikasi material ringan mortar-busa untuk konstruksi jalan. SKh-2.7.21:2024 yang diterbitkan Direktorat Jenderal Bina Marga menetapkan material ringan mortar-busa sebagai material yang terdiri atas pasir, semen, air, dan *foam agent*, dengan densitas kering yang direncanakan maksimum 8 kN/m³. Dokumen tersebut merupakan spesifikasi yang berlaku untuk material ringan mortar-busa dan menjadi dasar perancangan campuran dalam penelitian ini.

Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa umur pengerasan berhubungan dengan perkembangan kuat tekan mortar busa. (Susilowati & Nabhan, 2021) mengkaji pengaruh variasi faktor air-semen terhadap sifat fisis dan mekanis mortar busa, sedangkan (Tisnawan et al., 2023) mengevaluasi UCS pada beberapa variasi *foaming agent*. (Qiu et al., 2022) menunjukkan bahwa karakteristik *foaming agent* berhubungan dengan stabilitas busa dan sifat *foamed concrete*. Penelitian mengenai material mortar busa juga telah diarahkan pada penggunaan material alternatif dan penerapan lapangan. (Iskandar et al, 2024) mengkaji penggunaan serbuk kaca dan abu sekam padi pada formulasi timbunan mortar busa, Penelitian (Zhang et al., 2022) juga menunjukkan potensi *foamed concrete* berbasis material halus untuk aplikasi *backfill*. Berbagai penelitian tersebut memperlihatkan bahwa mortar busa memiliki potensi penggunaan dalam pekerjaan konstruksi jalan, tetapi karakteristik agregat tetap menjadi salah satu aspek yang perlu dikendalikan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat kesenjangan dalam kajian yang secara khusus menggunakan nilai modulus kehalusan sebagai parameter utama variasi agregat halus pada mortar busa dengan target kuat tekan bebas 2.000 kPa. Penelitian terdahulu telah membahas jenis pasir, ukuran butir, gradasi pasir, rasio pasir-semen, dan karakteristik *foam*, tetapi hasil penelitian mengenai hubungan karakteristik agregat dengan kuat tekan belum menunjukkan kecenderungan yang seragam. Selain itu, hasil penelitian beton konvensional tidak dapat langsung digunakan untuk menjelaskan perilaku mortar busa karena mortar busa memiliki sistem pori akibat penggunaan *foam agent*.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan variasi modulus kehalusan agregat halus sebagai parameter yang dikendalikan melalui analisis saringan dan rekayasa gradasi, kemudian diterapkan pada mortar busa dengan target UCS 2.000 kPa. Empat variasi FM digunakan, yaitu 2,022; 2,431; 2,858; dan 3,050, yang masing-masing mewakili karakteristik agregat halus berbeda. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari sehingga perkembangan kuat tekan berdasarkan perubahan modulus kehalusan dapat diamati secara bertahap.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi modulus kehalusan agregat halus terhadap kuat tekan bebas mortar busa pada umur 7, 14, dan 28 hari serta membandingkan perkembangan UCS pada setiap variasi FM. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai hubungan karakteristik gradasi agregat halus yang dinyatakan melalui nilai FM dengan kuat tekan mortar busa untuk mendukung pengembangan material ringan pada pekerjaan konstruksi jalan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi modulus kehalusan agregat halus terhadap kuat tekan bebas mortar busa. Tahapan penelitian meliputi persiapan bahan dan alat, pemeriksaan karakteristik agregat halus, analisis saringan dan penentuan nilai FM, rekayasa gradasi, perancangan campuran, pembuatan benda uji, curing, pengujian flow, pengujian kuat tekan bebas, pengujian densitas kering, serta analisis hasil. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Kampus C Universitas Bina Darma Palembang.

Penelitian eksperimental ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Kampus C Universitas Bina Darma, Palembang. Bahan-bahan yang digunakan meliputi Semen Portland Composite Cement (PCC) merek Conch, busa terstabilisasi hasil pengenceran foam agent berbasis surfaktan merek Ligno dengan rasio air 1:30 dan didorong udara bertekanan, air bersih, serta empat variasi agregat halus lokal (Pasir Musi Dua, Pasir Lahat, Pasir Sekayu, dan Pasir Tanjung Raja). Karakteristik fisis dari masing-masing agregat halus diuji sesuai standar SNI/ASTM dan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Fisis Agregat Halus

Kode Sampel	Sumber Pasir	Modulus Kehalusan (FM)	Kadar Lumpur (%)	Berat Jenis Bulk (g/cm ³)	Penyerapan Air (%)
FM-1	Pasir Musi Dua	2,022	4,20	2,42	2,85
FM-2	Pasir Lahat	2,431	2,10	2,50	2,10
FM-3	Pasir Sekayu	2,858	1,60	2,55	1,75
FM-4	Pasir Tanjung Raja	3,050	1,10	2,58	1,40

Guna memastikan evaluasi murni terhadap variasi kehalusan agregat tanpa adanya bias variasi proporsi bahan (prinsip ceteris paribus), rancangan campuran (mix design) dipertahankan konstan pada seluruh variasi dengan rasio semen-air sebesar 0,50 dan proporsi busa terukur. Detail proporsi campuran per meter kubik (1 m³) disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan Campuran (Mix Design) Mortar Busa per m³

Variasi FM	Semen PCC (kg)	Agregat Halus (kg)	Air Bebas (kg)	Foam Agent (liter)	Air (liter)	Foam
FM-1 (2,022)	350,00	350,00	175,00	1,20	36,00	
FM-2 (2,431)	350,00	350,00	175,00	1,20	36,00	

FM-3 (2,858)	350,00	350,00	175,00	1,20	36,00
FM-4 (3,050)	350,00	350,00	175,00	1,20	36,00

Pembuatan benda uji menggunakan cetakan silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Total benda uji yang disiapkan adalah 36 sampel (3 sampel per variasi FM untuk pengujian umur 7, 14, dan 28 hari). Pengujian sifat segar meliputi pengujian flow (meja sebar) dan densitas basah. Pengujian sifat mekanis berupa Kuat Tekan Bebas (UCS) dilakukan menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM) dengan laju pembebanan konstan sesuai ASTM C39 / SNI 03-1974-1990.

2.1 Material

Material yang digunakan terdiri atas semen Portland Composite Cement (PCC) merek Conch, agregat halus, air, dan foam agent merek Ligno. Pemeriksaan agregat halus meliputi analisis saringan, berat jenis dan penyerapan, berat isi, serta kadar lumpur. Air yang digunakan berupa air bersih, sedangkan foam agent digunakan untuk menghasilkan gelembung udara dalam campuran mortar busa. Pemeriksaan visual terhadap semen dan foam agent dilakukan sebelum digunakan.

2.2 Variasi Modulus Kehalusan

Variasi agregat halus diperoleh melalui analisis saringan dan rekayasa gradasi. Empat variasi digunakan, yaitu FM-1 dari Pasir Musi Dua, FM-2 dari Pasir Lahat, FM-3 dari Pasir Sekayu, dan FM-4 dari Pasir Tanjung Raja. Nilai FM hasil pengujian masing-masing sebesar 2,022; 2,431; 2,858; dan 3,050. Variasi tersebut berada pada rentang FM yang telah ditetapkan dalam rancangan penelitian.

Tabel 1. Variabel Benda Uji

N o	Kode Benda Uji	Range (FM)	Modulus Pasir (FM)	Umur Pengujian (Hari)	Jumlah Sampel
1	FM-1 (Pasir Musi Dua)	1,6 - 2,2	Pasir sangat halus	7 Hari	3
				14 Hari	3
				28 Hari	3
2	FM-2 (Pasir Lahat)	2,2 – 2,6	Pasir Sedang	7 Hari	3
				14 Hari	3
				28 Hari	3
3	FM-3 (Pasir Sekayu)	2,6 – 2,9	Pasir Agak Kasar	7 Hari	3
				14 Hari	3
				28 Hari	3
4	FM-4	2,9 – 3,2	Pasir Kasar	7 Hari	3

(Pasir Tanjung Raja)			14 Hari	3
			28 Hari	3
Jumlah Benda Uji			36	

2.3 Benda Uji dan Perancangan Campuran

Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Setiap variasi FM dibuat sebanyak tiga benda uji untuk masing-masing umur pengujian, yaitu 7, 14, dan 28 hari, sehingga jumlah total benda uji sebanyak 36 buah. Material penyusun terdiri atas semen PCC, air, agregat halus, dan *foam agent* Ligno. Penyesuaian proporsi campuran dilakukan berdasarkan karakteristik masing-masing variasi agregat halus. Agregat dengan nilai FM lebih kecil memiliki kecenderungan ukuran butir lebih halus dan luas permukaan butir lebih besar sehingga kebutuhan pasta semen disesuaikan dalam rancangan campuran.

2.4 Pengujian dan Analisis Data

Pengujian *flow* dilakukan pada kondisi segar untuk mengetahui karakteristik kemudahan aliran campuran. Pengujian kuat tekan bebas dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari dengan mencatat beban maksimum yang diterima benda uji hingga mengalami keruntuhan. Nilai UCS kemudian dihitung berdasarkan beban maksimum dan luas penampang benda uji. Setiap kombinasi variasi FM dan umur menggunakan rata-rata tiga benda uji. Analisis data dilakukan dengan menghitung nilai FM dari hasil analisis saringan, membandingkan UCS antarvariasi FM, menganalisis perkembangan kuat tekan berdasarkan umur, serta membandingkan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu. Pengujian densitas kering dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari dengan membandingkan berat benda uji terhadap volumenya. Volume benda uji silinder adalah 1.570,80 cm³.

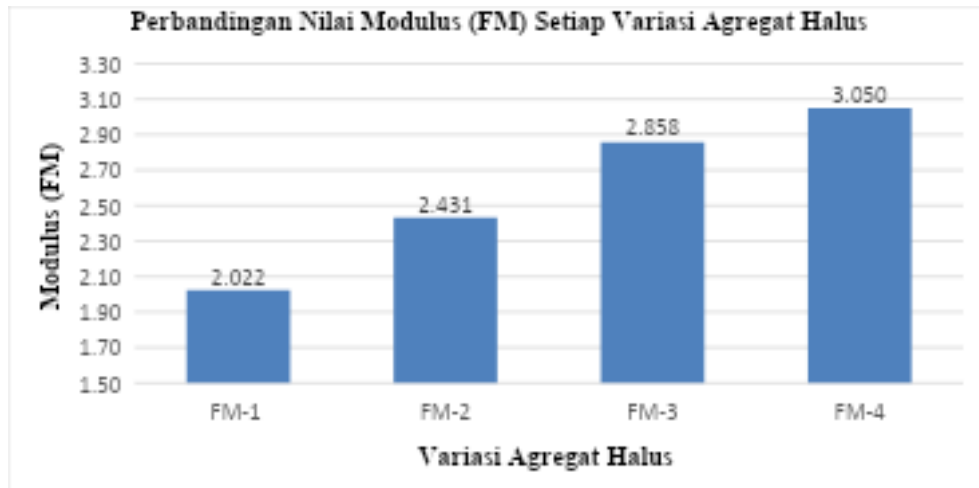
HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Nilai Modulus Kehalusan Agregat Halus

Hasil analisis saringan dan rekayasa gradasi menghasilkan empat nilai modulus kehalusan agregat halus, yaitu 2,022 pada FM-1, 2,431 pada FM-2, 2,858 pada FM-3, dan 3,050 pada FM-4. FM-1 merupakan variasi dengan agregat paling halus, sedangkan FM-4 merupakan variasi dengan kecenderungan agregat paling kasar.

Tabel 2. Perbandingan Nilai Modulus Kehalusan Agregat Halus

Variasi	FM
FM-1	2,022
FM-2	2,431
FM-3	2,858
FM-4	3,050



Gambar 1. Perbandingan Nilai FM Setiap Variasi Halus

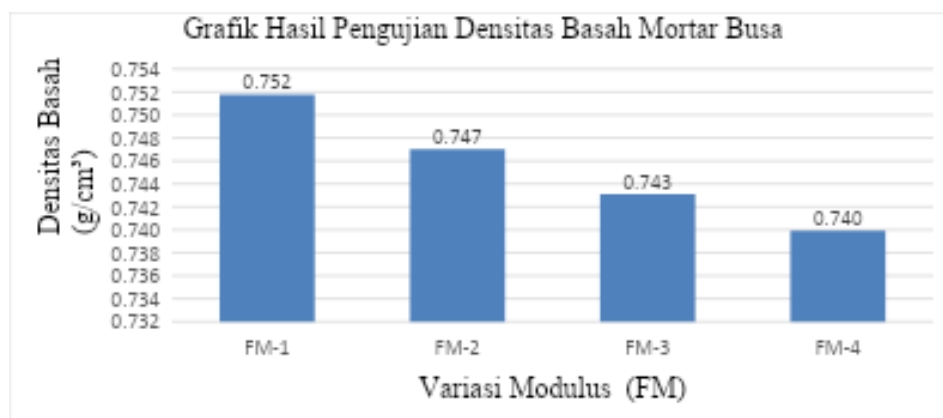
Perbedaan nilai FM menunjukkan adanya perbedaan distribusi ukuran butir agregat halus. Peningkatan FM menunjukkan kecenderungan ukuran butir yang semakin kasar. Kondisi ini dapat memengaruhi susunan partikel dan rongga antarbutir dalam campuran. Dalam mortar busa, pengaruh tersebut berinteraksi dengan pasta semen dan rongga udara yang terbentuk oleh *foam agent*, sehingga perubahan gradasi dapat berhubungan dengan perubahan sifat mekanik material.

3.2 Flow dan Densitas Basah

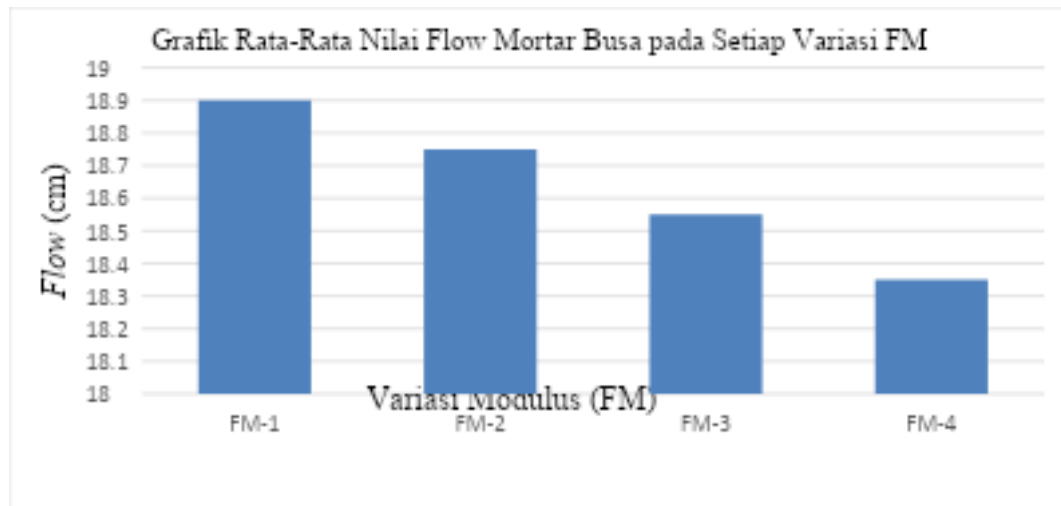
Hasil pengujian *flow* dan densitas basah ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 3. Nilai Flow dan Densitas Basah Mortar Busa

Kode Benda Uji	Variasi <i>Flow</i> (cm)	Densitas basah (g/cm ³)
FM-1	18,90	124
FM-2	18,75	124
FM-3	18,55	124
FM-4	18,35	124



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Densitas Basah Mortar Busa



Gambar 3. Grafik Rata Rata Nilai *Flow* Mortar Busa

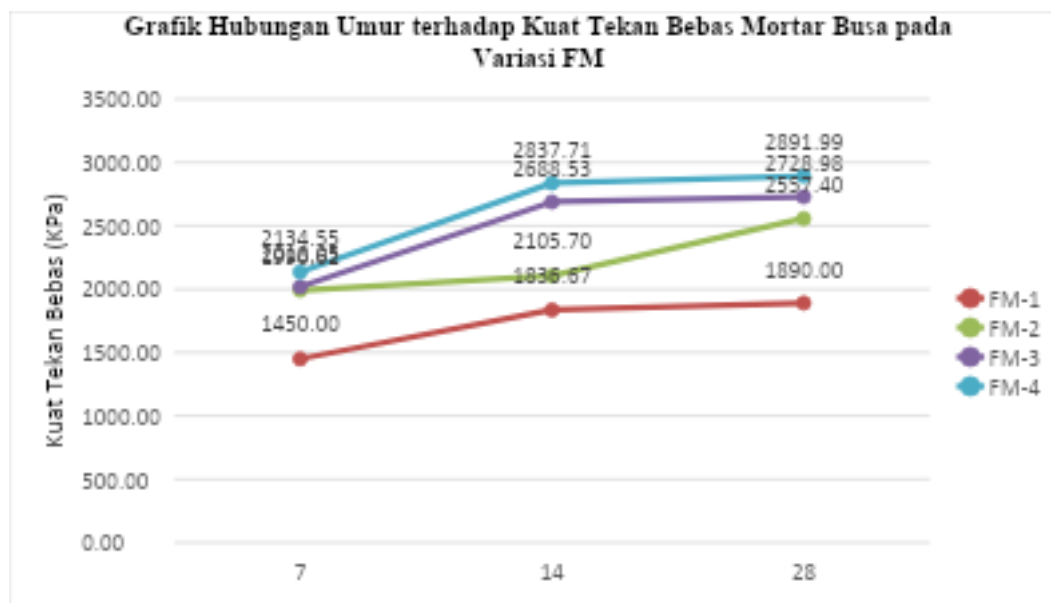
Nilai *flow* berturut-turut sebesar 18,90; 18,75; 18,55; dan 18,35 cm dari FM-1 sampai FM-4. Sementara itu, densitas basah masing-masing sebesar 0,752; 0,747; 0,743; dan 0,740 g/cm³. Hasil tersebut menunjukkan kecenderungan penurunan *flow* dan densitas basah seiring meningkatnya nilai FM, tetapi perbedaannya relatif kecil. Penurunan *flow* pada FM yang lebih tinggi menunjukkan bahwa karakteristik ukuran butir agregat memberikan pengaruh terhadap kondisi segar campuran. Namun, selisih nilai *flow* antarvariasi relatif kecil sehingga perbedaan tersebut tidak menunjukkan perubahan yang besar pada karakteristik aliran mortar busa.

3.3 Kuat Tekan Bebas Mortar Busa

Hasil pengujian UCS seluruh variasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 4. Rekapitulasi Kuat Tekan Bebas Mortar Busa

Umur	Kuat Tekan Rata-rata (KPa)			
	FM-1	FM-2	FM-3	FM-4
7	1450,00	1990,62	2018,05	2134,55
14	1836,67	2105,70	2688,53	2837,71
28	1890,00	2557,40	2728,98	2891,99



Gambar 4. Grafik Hubungan Umur terhadap Kuat Tekan Bebas

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai UCS meningkat seiring bertambahnya umur pengerasan pada seluruh variasi FM. Pada umur 7 hari, nilai UCS meningkat dari 1.450,00 kPa pada FM-1 menjadi 2.134,55 kPa pada FM-4. Pada umur 14 hari, nilai meningkat dari 1.836,67 kPa menjadi 2.837,71 kPa, sedangkan pada umur 28 hari meningkat dari 1.890,00 kPa menjadi 2.891,99 kPa. Peningkatan kuat tekan terhadap umur menunjukkan perkembangan ikatan material selama proses pengerasan. Kecenderungan ini sejalan dengan penelitian (Susilowati & Nabhan, 2021) yang menunjukkan perkembangan sifat mekanik mortar busa terhadap umur pengujian. Penelitian. Selain pengaruh umur, terlihat kecenderungan peningkatan UCS dengan meningkatnya nilai FM. FM-1 menghasilkan nilai terendah pada ketiga umur, sedangkan FM-4 menghasilkan nilai tertinggi. Pada umur 28 hari, perbedaan antara FM-1 dan FM-4 mencapai 1.001,99 kPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada komposisi penelitian ini, agregat dengan nilai FM lebih tinggi menghasilkan karakteristik kuat tekan yang lebih besar. Kecenderungan tersebut dapat dikaitkan dengan perbedaan distribusi ukuran butir dan susunan partikel. Agregat yang lebih kasar dapat menghasilkan kondisi susunan butir yang berbeda dibandingkan agregat yang lebih halus sehingga berpotensi memengaruhi volume rongga dan kebutuhan pasta dalam campuran.

3.4 Pencapaian Target 2.000 kPa

Target kuat tekan 2.000 kPa digunakan sebagai dasar perancangan campuran sesuai spesifikasi mortar-busa untuk konstruksi jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak semua variasi mencapai target tersebut pada setiap umur. Pada umur 7 hari, FM-1 dan FM-2 belum mencapai 2.000 kPa, sedangkan FM-3 dan FM-4 telah mencapai masing-masing 2.018,05 kPa dan 2.134,55 kPa. Pada umur 14 hari, seluruh variasi kecuali FM-1 telah mencapai 2.000 kPa. Pada umur 28 hari, FM-2, FM-3, dan FM-4 telah mencapai target, sedangkan FM-1 masih berada pada 1.890,00 kPa. Dengan demikian, berdasarkan hasil pengujian umur 28 hari, tiga variasi yaitu FM-2, FM-3, dan FM-4 telah mencapai target 2.000 kPa, sedangkan FM-1 belum mencapai target. Hasil tersebut memperlihatkan

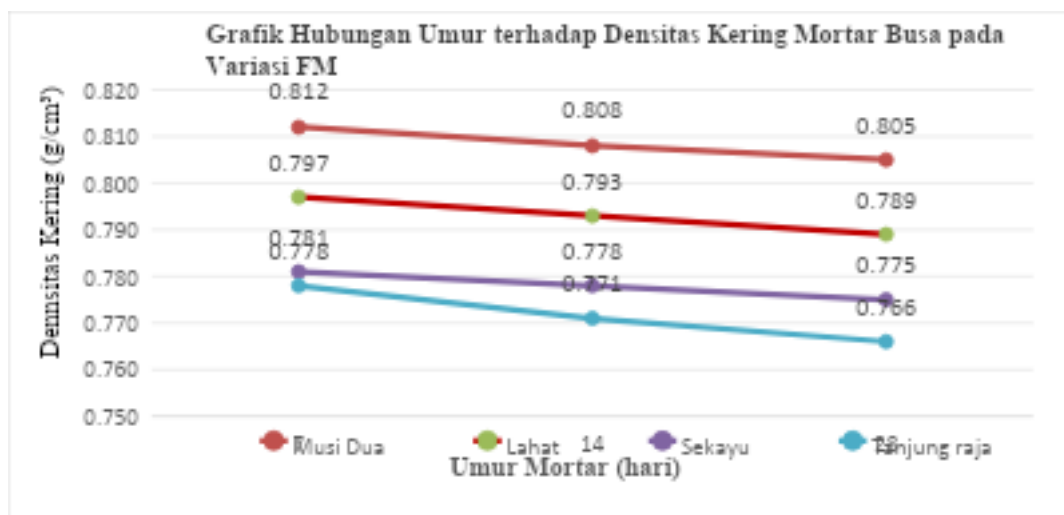
bahwa nilai FM menjadi salah satu parameter yang perlu diperhatikan dalam menghasilkan kuat tekan sesuai target campuran.

3.5 Densitas Kering

Hasil densitas kering menunjukkan kecenderungan penurunan seiring bertambahnya umur pengujian. Nilai densitas kering FM-1 pada umur 7, 14, dan 28 hari masing-masing sebesar 0,812; 0,808; dan 0,805 g/cm³. Pada FM-2 diperoleh 0,797; 0,793; dan 0,789 g/cm³. FM-3 menghasilkan 0,781; 0,778; dan 0,775 g/cm³, sedangkan FM-4 menghasilkan 0,778; 0,771; dan 0,766 g/cm³.

Tabel 5. Hasil Densitas Kering Kuat Tekan Bebas Mortar Busa

Umur Mortar (hari)	FM-1 Pasir Musi Dua	FM-2 Pasir Lahat	FM-3 Pasir Sekayu	FM-4 Pasir Tanjung Raja
7	0,812	0,797	0,781	0,778
14	0,808	0,793	0,778	0,771
28	0,805	0,789	0,775	0,766



Gambar 5. Grafik Hubungan Umur terhadap Densitas Kering Mortar Busa

Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi dengan FM lebih tinggi cenderung menghasilkan densitas kering yang lebih rendah. Pada umur 28 hari, FM-4 menghasilkan densitas 0,766 g/cm³, sedangkan FM-1 menghasilkan 0,805 g/cm³. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai FM pada penelitian ini tidak hanya diikuti perubahan kuat tekan, tetapi juga perubahan densitas kering.

Kondisi tersebut penting karena mortar busa dirancang sebagai material ringan. SKh-2.7.21:2024 menyatakan bahwa material ringan mortar-busa digunakan sebagai pengganti timbunan tanah untuk mengurangi beban timbunan dan direncanakan dengan densitas kering maksimum 8 kN/m³. Dengan demikian, hasil densitas kering perlu dibaca bersama dengan hasil UCS untuk memahami karakteristik masing-masing variasi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian memperlihatkan bahwa modulus kehalusan agregat halus merupakan parameter yang perlu diperhatikan dalam perancangan mortar busa.

Variasi nilai FM tidak hanya memengaruhi kuat tekan bebas, tetapi juga berhubungan dengan densitas material dan kemampuan mencapai target kinerja yang dipersyaratkan untuk aplikasi konstruksi jalan.

Temuan penelitian ini juga memberikan dasar bagi pengembangan spesifikasi material mortar busa yang mempertimbangkan karakteristik agregat halus sebagai parameter desain. Dengan memperhatikan nilai modulus kehalusan agregat sejak tahap perencanaan campuran, kualitas material yang dihasilkan dapat lebih konsisten dan sesuai dengan kebutuhan lapangan.

Dalam pekerjaan konstruksi jalan pada tanah lunak atau tanah dengan daya dukung rendah, penggunaan material ringan sangat penting untuk mengurangi risiko penurunan dan kerusakan struktur. Mortar busa dengan nilai kuat tekan yang memadai dapat digunakan sebagai alternatif timbunan konvensional karena memiliki berat yang lebih rendah namun tetap mampu menahan beban sesuai kebutuhan.

Hasil penelitian memiliki implikasi praktis dalam pemilihan sumber agregat halus untuk produksi mortar busa. Variasi FM-2, FM-3, dan FM-4 terbukti mampu mencapai target kuat tekan 2.000 kPa pada umur pengujian tertentu, sedangkan FM-4 memberikan performa terbaik secara keseluruhan. Oleh karena itu, pemilihan agregat dengan nilai FM yang sesuai dapat menjadi salah satu strategi untuk meningkatkan kualitas mortar busa.

Hasil pengujian sifat segar, densitas kering, dan perkembangan kuat tekan bebas (UCS) dari keempat variasi mortar busa dirangkum dalam Tabel 3. Seluruh data densitas basah dan densitas kering disajikan menggunakan satuan baku g/cm^3 yang sinkron antara tabel dan narasi pembahasan.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Segar, Densitas, dan UCS Mortar Busa

Variasi	FM	Flow (cm)	Densitas Basah (g/cm^3)	Densitas Kering (g/cm^3)	UCS 7 Hari (kPa)	UCS 14 Hari (kPa)	UCS 28 Hari (kPa)
FM-1	2,022	18,90	0,752	0,805	1.450,00	1.836,67	1.890,00
FM-2	2,431	18,65	0,748	0,789	1.990,62	2.105,70	2.557,40
FM-3	2,858	18,48	0,744	0,775	2.018,05	2.688,53	2.728,98
FM-4	3,050	18,35	0,740	0,766	2.134,55	2.837,71	2.891,99

Pengujian kondisi segar menunjukkan bahwa nilai flow mengalami penurunan seiring meningkatnya nilai FM, yakni dari 18,90 cm pada FM-1 menjadi 18,35 cm pada FM-4. Penurunan workabilitas ini disebabkan oleh friksi antarpartikel agregat yang lebih kasar. Sebaliknya, densitas basah menunjukkan tren sedikit menurun dari 0,752 g/cm^3 (FM-1) menjadi 0,740 g/cm^3 (FM-4). Pada umur 28 hari, nilai densitas kering tercatat pada rentang 0,766–0,805 g/cm^3 . Seluruh variasi memenuhi kriteria timbunan ringan di bawah spesifikasi teknis SKh-2.7.21:2024 yang mensyaratkan densitas kering terpasang $< 0,90 \text{ g/cm}^3$.

Analisis mendalam terhadap tren hubungan antara densitas kering dan kuat tekan bebas (UCS) mengungkap fenomena yang sangat menarik. Secara konvensional, material berbasis semen mengalami peningkatan kuat tekan seiring meningkatnya densitas.

Namun, dalam sistem selular mortar busa ini terjadi anomali ilmiah di mana variasi FM-4 yang memiliki densitas kering paling rendah ($0,766 \text{ g/cm}^3$) justru menghasilkan UCS 28 hari paling tinggi ($2.891,99 \text{ kPa}$). Sebaliknya, FM-1 dengan densitas kering tertinggi ($0,805 \text{ g/cm}^3$) menghasilkan UCS paling rendah ($1.890,00 \text{ kPa}$).

Anomali mekanis ini dapat dijelaskan secara mikroskopis berbasis interaksi ITZ dan teori particle packing. Agregat halus yang sangat halus (FM-1, pasir Musi Dua) memiliki luas permukaan spesifik (specific surface area) yang jauh lebih besar. Luas permukaan yang masif ini menyerap sebagian besar air bebas dalam campuran untuk pembasahan partikel (wetting requirement). Akibat berkurangnya ketersediaan air bebas untuk hidrasi semen dan penstabilan gelembung, terbentuk porositas kapiler yang tinggi pada matriks pasta semen di sekitar gelembung. Selain itu, peninggian viskositas matriks akibat penyerapan air memicu penggabungan gelembung busa (foam bubble coalescence) sehingga dinding selular menjadi tipis dan rentan pecah. Di sisi lain, agregat kasar (FM-4, pasir Tanjung Raja) memiliki luas permukaan spesifik yang lebih rendah sehingga air bebas dapat dimanfaatkan secara optimal untuk hidrasi semen. Butiran kasar ini membentuk kerangka butir (skeleton packing) yang interlocking dan kokoh tanpa merusak stabilitas dinding rongga busa. Kerangka butir tersebut menyediakan jalur transfer beban tekan yang lebih kaku (rigid load-bearing pathways) saat menerima beban mekanis, sehingga menghasilkan UCS yang signifikan lebih tinggi meskipun memiliki densitas kering yang lebih ringan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik agregat halus yang direpresentasikan oleh nilai modulus kehalusan memiliki peran penting dalam menentukan performa mekanik mortar busa. Perbedaan nilai FM yang digunakan pada penelitian ini menghasilkan variasi kuat tekan yang cukup jelas pada seluruh umur pengujian. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir agregat tidak hanya memengaruhi kondisi segar campuran, tetapi juga berpengaruh terhadap proses pembentukan struktur internal material selama proses pengerasan. Dalam sistem mortar busa, agregat berfungsi sebagai kerangka yang bekerja bersama pasta semen dan rongga udara hasil pembentukan foam agent. Oleh karena itu, perubahan karakteristik agregat akan memengaruhi keseimbangan antara kekuatan, densitas, dan stabilitas campuran secara keseluruhan.

Kecenderungan peningkatan kuat tekan pada variasi dengan nilai FM yang lebih tinggi menunjukkan bahwa agregat yang relatif lebih kasar mampu menghasilkan susunan partikel yang lebih efektif. Susunan partikel yang baik memungkinkan distribusi beban menjadi lebih merata ketika material menerima tekanan. Pada saat yang sama, ruang antarbutir dapat terisi secara lebih efisien oleh pasta semen sehingga terbentuk ikatan yang lebih kuat antar komponen penyusun mortar busa. Kondisi ini berbeda dengan agregat yang sangat halus karena luas permukaan partikel yang lebih besar akan meningkatkan kebutuhan pasta untuk melapisi seluruh permukaan agregat. Apabila jumlah pasta yang tersedia tidak bertambah secara proporsional, maka efisiensi ikatan antarpartikel dapat menurun dan berdampak pada berkurangnya kemampuan material dalam menahan beban tekan.

Perkembangan kuat tekan yang terjadi pada umur 7, 14, dan 28 hari menunjukkan bahwa proses hidrasi semen berlangsung secara berkelanjutan sepanjang periode pengujian. Pada tahap awal pengerasan, pembentukan produk hidrasi masih berlangsung secara intensif sehingga peningkatan kuat tekan dari umur 7 hari menuju 14 hari terlihat cukup signifikan. Setelah memasuki umur 28 hari, peningkatan kuat tekan masih terjadi

meskipun dengan laju yang lebih rendah. Pola tersebut merupakan indikasi bahwa struktur mikro mortar busa semakin matang dan ikatan antarpartikel menjadi lebih kuat seiring bertambahnya umur pengujian. Hasil ini memperlihatkan bahwa pengaruh modulus kehalusan agregat tidak berdiri sendiri, melainkan bekerja bersama proses hidrasi semen dalam menentukan performa akhir material.

Dari sudut pandang rekayasa material, hubungan antara nilai FM dan kuat tekan dapat dijelaskan melalui konsep kepadatan susunan partikel. Agregat dengan distribusi ukuran yang lebih sesuai cenderung menghasilkan konfigurasi butiran yang mampu meminimalkan rongga antarpartikel. Berkurangnya rongga tersebut memungkinkan pasta semen berfungsi secara lebih efektif sebagai bahan pengikat. Pada mortar busa, keberadaan gelembung udara memang sengaja dipertahankan untuk menghasilkan material ringan, namun distribusi agregat yang baik dapat membantu mengendalikan pengaruh negatif pori terhadap kekuatan material. Dengan kata lain, peningkatan kuat tekan yang diperoleh pada variasi FM yang lebih tinggi menunjukkan bahwa sistem pori yang terbentuk masih dapat diimbangi oleh struktur agregat yang lebih stabil.

Hasil penelitian juga memperlihatkan adanya hubungan yang menarik antara densitas kering dan kuat tekan. Secara umum, material dengan densitas yang lebih tinggi sering diasosiasikan dengan kuat tekan yang lebih besar. Namun pada penelitian ini ditemukan bahwa variasi dengan FM yang lebih tinggi mampu menghasilkan kuat tekan yang lebih besar meskipun densitas keringnya cenderung lebih rendah. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa densitas bukan satu-satunya faktor yang menentukan kekuatan mortar busa. Efektivitas susunan partikel, kualitas ikatan pasta semen, dan distribusi rongga di dalam material memiliki kontribusi yang sama pentingnya dalam membentuk karakteristik mekanik mortar busa.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan performa mortar busa dapat dicapai tanpa harus meningkatkan berat material secara signifikan. Hal ini merupakan keuntungan yang sangat penting dalam aplikasi konstruksi jalan karena salah satu tujuan utama penggunaan mortar busa ada. Apabila ditinjau dari perspektif rekayasa material, peningkatan kuat tekan pada variasi agregat dengan nilai FM yang lebih tinggi menunjukkan bahwa kualitas struktur internal mortar busa tidak hanya ditentukan oleh jumlah pasta semen yang digunakan, tetapi juga oleh bagaimana agregat tersusun di dalam campuran. Distribusi ukuran butir yang lebih sesuai memungkinkan terbentuknya kerangka agregat yang lebih stabil sehingga beban yang bekerja pada material dapat disalurkan secara lebih merata. Ketika beban tekan diberikan, gaya yang diterima material tidak hanya ditahan oleh pasta semen, tetapi juga didistribusikan melalui kontak antarbutir agregat. Oleh karena itu, konfigurasi agregat yang lebih efisien akan menghasilkan kemampuan menahan beban yang lebih baik dibandingkan susunan partikel yang kurang optimal.

Fenomena tersebut menjadi semakin penting pada mortar busa karena material ini memiliki karakteristik yang berbeda dengan beton normal maupun mortar konvensional. Kehadiran gelembung udara yang sengaja dibentuk selama proses pencampuran menyebabkan sebagian volume material terdiri atas rongga-rongga yang tidak berperan langsung dalam menahan beban. Akibatnya, efektivitas komponen padat yang tersisa menjadi faktor utama yang menentukan kekuatan material. Dalam kondisi tersebut, perubahan kecil pada distribusi ukuran agregat dapat memberikan dampak yang lebih besar dibandingkan pada material tanpa sistem pori yang signifikan. Hasil penelitian ini

memperlihatkan bahwa perbedaan nilai FM yang relatif tidak terlalu besar tetap mampu menghasilkan variasi kuat tekan yang cukup nyata pada seluruh umur pengujian.

Perkembangan kuat tekan yang terjadi pada masing-masing variasi juga menunjukkan bahwa proses pembentukan struktur material berlangsung secara bertahap. Pada umur awal, sebagian besar kekuatan berasal dari hasil reaksi hidrasi semen yang mulai mengikat agregat dan membentuk matriks padat. Seiring bertambahnya umur, produk hidrasi terus berkembang dan mengisi ruang-ruang mikro di dalam campuran sehingga ikatan antarpartikel menjadi semakin kuat. Proses tersebut menyebabkan peningkatan kapasitas material dalam menerima beban tekan. Walaupun semua variasi mengalami peningkatan kekuatan, laju perkembangan yang berbeda menunjukkan bahwa karakteristik agregat memberikan pengaruh terhadap efektivitas proses pembentukan struktur tersebut.

Dari sisi teknis, hasil penelitian memberikan gambaran bahwa pengendalian modulus kehalusan agregat dapat digunakan sebagai salah satu metode sederhana untuk meningkatkan performa mortar busa. Nilai FM merupakan parameter yang mudah diperoleh melalui pengujian analisis saringan sehingga relatif mudah diterapkan pada kegiatan pengendalian mutu material di lapangan. Dengan mengetahui rentang nilai FM yang mampu menghasilkan kuat tekan sesuai target, proses pemilihan material dapat dilakukan secara lebih terarah. Pendekatan ini memiliki keuntungan karena tidak memerlukan teknologi yang rumit ataupun biaya tambahan yang besar, tetapi tetap mampu memberikan dampak terhadap kualitas produk yang dihasilkan.

Selain berpengaruh terhadap kuat tekan, variasi nilai FM juga menunjukkan hubungan dengan perubahan densitas material. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa peningkatan FM cenderung diikuti oleh penurunan densitas kering. Kondisi ini mengindikasikan bahwa karakteristik agregat tidak hanya memengaruhi kekuatan, tetapi juga berhubungan dengan efisiensi penggunaan material padat dalam campuran. Dalam konteks material ringan, temuan tersebut memiliki arti yang penting karena tujuan utama penggunaan mortar busa adalah menghasilkan material dengan berat yang rendah namun tetap memiliki kapasitas dukung yang memadai. Dengan demikian, pencapaian kuat tekan yang lebih tinggi pada densitas yang lebih rendah dapat dianggap sebagai indikasi peningkatan efisiensi material.

Hubungan antara densitas dan kuat tekan yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut tidak selalu berbanding lurus. Pada beberapa jenis material, peningkatan densitas sering diikuti oleh peningkatan kekuatan. Namun pada mortar busa, distribusi pori, kualitas pasta semen, dan konfigurasi agregat dapat memberikan pengaruh yang sama pentingnya. Oleh karena itu, evaluasi performa mortar busa tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu parameter saja. Interpretasi yang lebih komprehensif perlu mempertimbangkan interaksi antara densitas, kuat tekan, gradasi agregat, dan karakteristik pori yang terbentuk selama proses produksi.

Dalam penerapan praktis, hasil penelitian ini berpotensi memberikan manfaat bagi perencanaan konstruksi jalan pada daerah dengan kondisi tanah lunak. Salah satu tantangan utama pada konstruksi di atas tanah lunak adalah tingginya risiko penurunan akibat beban timbunan. Penggunaan mortar busa sebagai material ringan menjadi salah satu solusi karena mampu mengurangi tekanan yang diterima tanah dasar. Namun demikian, material yang digunakan tetap harus memiliki kekuatan yang cukup agar mampu mempertahankan stabilitas konstruksi. Oleh karena itu, informasi mengenai pengaruh modulus kehalusan agregat terhadap kuat tekan menjadi sangat relevan karena

dapat membantu menghasilkan material yang ringan sekaligus memenuhi kebutuhan struktural.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pemanfaatan agregat lokal dengan karakteristik tertentu dapat memberikan performa yang memadai untuk pembuatan mortar busa. Temuan ini memiliki implikasi ekonomi yang cukup penting karena penggunaan material lokal dapat mengurangi biaya transportasi dan meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek. Selain itu, pemanfaatan sumber daya lokal juga dapat mendukung keberlanjutan pembangunan infrastruktur dengan mengurangi ketergantungan terhadap material dari daerah lain. Meskipun demikian, karakteristik agregat tetap perlu diuji terlebih dahulu untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi persyaratan teknis yang dibutuhkan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen dan pembahasan mengenai pengaruh Modulus Kehalusan (FM) agregat halus terhadap mortar busa, dapat ditarik kesimpulan komprehensif sebagai berikut:

1. Modulus Kehalusan agregat halus berpengaruh signifikan terhadap performa mekanis mortar busa. Penggunaan pasir yang lebih kasar (FM tinggi) berhasil meningkatkan Kuat Tekan Bebas (UCS) secara konsisten pada umur 7, 14, dan 28 hari.
2. Penurunan nilai UCS pada agregat sangat halus (FM-1) disebabkan oleh tinggi luas permukaan spesifik yang menyerap air bebas, memicu porositas kapiler pada ITZ, dan memicu foam bubble coalescence. Sebaliknya, agregat kasar (FM-4) membentuk skeleton packing yang efisien dengan jalur transfer beban yang kaku (rigid load-bearing pathways).
3. Seluruh variasi campuran memenuhi kriteria densitas kering timbunan ringan ($0,766\text{--}0,805\text{ g/cm}^3$) dan nilai flow ($18,35\text{--}18,90\text{ cm}$) sesuai kriteria teknis SKh-2.7.21:2024.
4. Tiga dari empat variasi yang diuji (FM-2, FM-3, dan FM-4) berhasil melampaui target syarat minimal UCS 28 hari sebesar 2.000 kPa.
5. Diformulasikan rekomendasi teknis bahwa penggunaan agregat halus dengan ambang batas aman $FM \geq 2,43$ sangat disarankan pada pekerjaan timbunan ringan jalan guna menjamin pencapaian standar mutu UCS 28 hari $\geq 2.000\text{ kPa}$ di lapangan.

DAFTAR REFERENSI

- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Abang Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005.
- ASTM C33 / C33M-18. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C39 / C39M-21. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Basri, D. R. B., Putri, E. E., Adj, B. M., & Hakam, A. (2021). Physical and mechanical characteristics of foamed mortar with local South Sumatra sands. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(4), 450-462.
- Bina Marga. (2024). *Spesifikasi Khusus Timbunan Ringan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan (SKh-2.7.21:2024)*. Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta.
- de Larrard, F. (1999). *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*. E & FN Spon, London.

- de Larrard, F., & Sedran, T. (1994). Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 997-1009.
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., & Gugliandolo, E. (2018). Key factors affecting the compressive strength of foamed concrete. *Brick and Tile Industry International*, 3, 42-53.
- Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). Utilisation of foamed concrete in construction: a review. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 158(6), 371-385.
- Kearsley, E. P., & Wainwright, P. J. (2001). The effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 805-812.
- Kearsley, E. P., & Wainwright, P. J. (2002). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 241-246.
- Lesovik, V., Voronov, V., Glagolev, E., & Fediuk, R. (2020). Improving the structure of foamed concrete by optimizing the grain size distribution of aggregates. *Construction and Building Materials*, 237, 117621.
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 475-480.
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 221-230.
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2008). Fresh and hardened properties of foam concrete mix design. *Magazine of Concrete Research*, 60(4), 243-252.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited, Harlow.
- Othman, R., Jaya, R. P., Muthusamy, K., Sulaiman, M., & Duraisamy, Y. (2021). Relation between aggregate grading and compressive strength of foamed concrete. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1820-1825.
- Pan, Z., Li, H., & Liu, W. (2014). Preparation and characterization of super-lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 276-282.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K. K., & Indu Siva Ranjani, G. (2009). A review of the properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 23(1), 284-296.
- SNI 03-1974-1990. (1990). *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- SNI 03-2816-1992. (1992). *Metode Pengujian Bahan Organik dalam Pasir untuk Campuran Mortar atau Beton*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- SNI 03-4804-1998. (1998). *Metode Pengujian Bobot Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Sun, C., Zhu, Y., Guo, J., Zhang, Y., & Sun, G. (2018). Effects of foaming agent type and aggregate size on pore structure of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 169, 741-749.
- Tada, S. (1986). Material properties of aerated concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 8(1), 27-34.
- Zaetang, Y., Wongsas, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2015). Use of lightweight aggregates in cellular lightweight concrete for thermal insulation. *Materials & Design*, 83, 716-724.

