

Analisis Pengaruh Kehalusan *Fly Ash* Sebagai Substitusi Semen Dalam Pembuatan Mortar Busa

Azzahra Dwi Lintang Sakina¹, Firdaus²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bina Darma, Palembang, Indonesia

*Corresponding author: zahrap249@gmail.com¹

Abstrak: Penelitian ini menganalisis pengaruh tingkat kehalusan *Fly Ash* sebagai substitusi sebagian semen terhadap waktu ikat (*setting time*) dan kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength/UCS*) mortar busa. Pengujian dilakukan secara eksperimental menggunakan *Fly Ash* dari salah satu PLTU di Sumatera Selatan yang dipisahkan berdasarkan kehalusannya melalui metode *Filtering of Fly Ash Based on Fall Zone* menjadi Zona 0, Zona 1, Zona 2, dan Zona 3, kemudian disubstitusikan sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen. Campuran dasar terdiri atas semen PCC Conch 25,64 kg, air 14,9 kg, pasir Tanjung Raja 24,7 kg, dan *foam* Ligno. Pengujian meliputi *flow*, densitas basah, *setting time*, densitas kering, dan UCS umur 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kadar *Fly Ash* memperpanjang waktu ikat, sedangkan peningkatan kehalusan mempercepatnya, dengan *initial setting time* 90–135 menit dan *final setting time* 150–210 menit. Pola kuat tekan bervariasi antarzona: Zona 1 optimum pada substitusi 10%, sedangkan Zona 2 dan Zona 3 optimum pada 15%, dengan nilai tertinggi pada Zona 3 sebesar 1.444 kPa. Seluruh variasi menghasilkan densitas kering di bawah 0,6 g/cm³ dan kuat tekan di atas 800 kPa, memenuhi kriteria mortar busa ringan. Dengan demikian, tingkat kehalusan dan persentase substitusi *Fly Ash* perlu dipertimbangkan bersamaan untuk memperoleh komposisi optimal.

Kata kunci: mortar busa, *Fly Ash*, kehalusan, *setting time*, UCS

Abstract: This study analyzes the effect of fly ash fineness as a partial cement replacement on the setting time and unconfined compressive strength (UCS) of foam mortar. Fly ash sourced from a power plant in South Sumatra was separated by fineness using the Filtering of Fly Ash Based on Fall Zone method into Zone 0, Zone 1, Zone 2, and Zone 3, then substituted at 5%, 10%, 15%, and 20% of cement weight. The base mixture consisted of 25.64 kg PCC Conch cement, 14.9 kg water, 24.7 kg Tanjung Raja sand, and Ligno foam. Tests included flow, wet density, setting time, dry density, and 28-day UCS. Results show that higher fly ash content prolongs the setting time, while finer fly ash shortens it, with an initial setting time of 90–135 minutes and a final setting time of 150–210 minutes. Compressive strength varied by zone: Zone 1 peaked at 10% replacement, while Zone 2 and Zone 3 peaked at 15%, with the highest value in Zone 3 at 1,444 kPa. All variations produced dry densities below 0.6 g/cm³ and UCS above 800 kPa, meeting the lightweight foam mortar criteria. Fly ash fineness and replacement level should therefore be considered jointly to obtain an optimal mixture.

Keywords: foam mortar, *Fly Ash*, fineness, setting time, UCS

Pendahuluan

Mortar merupakan material komposit yang tersusun atas semen, agregat halus, dan air yang digunakan sebagai bahan perekat, pengisi, maupun pelapis dalam pekerjaan konstruksi. Perkembangan teknologi konstruksi mendorong penggunaan material yang tidak hanya memiliki kekuatan yang memadai, tetapi juga memiliki bobot ringan dan kemudahan dalam pelaksanaan. Salah satu material yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah mortar busa. Penambahan foam pada mortar menghasilkan struktur berpori sehingga dapat menurunkan berat material dan mengurangi beban yang diterima struktur. Namun, terbentuknya rongga udara juga dapat menurunkan kemampuan material dalam menahan beban tekan. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan komposisi campuran agar mortar busa tetap memiliki sifat ringan dengan kekuatan yang sesuai dengan kebutuhan (Shankar dkk., 2023).

Penggunaan semen dalam mortar busa menjadi salah satu hal yang perlu diperhatikan karena kebutuhan semen yang relatif tinggi dapat meningkatkan penggunaan material dan biaya, sementara proses produksinya juga memberikan dampak terhadap lingkungan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah menggunakan material lain sebagai substitusi sebagian semen (Prasetya & Solikin, 2024). *Fly Ash* merupakan material hasil samping pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi semen (Susilowati dkk., 2024). Keberadaan PLTU di Sumatera Selatan menghasilkan *Fly Ash* dalam jumlah yang cukup besar sehingga pemanfaatannya sebagai material konstruksi dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan nilai guna limbah tersebut. *Fly Ash* memiliki kandungan silika yang bersifat pozzolanik sehingga dapat berkontribusi terhadap pembentukan senyawa pengikat dalam campuran mortar.

Pemanfaatan *Fly Ash* pada mortar tidak hanya dipengaruhi oleh persentase substitusinya, tetapi juga oleh karakteristik fisik material, terutama tingkat kehalusan. Perbedaan kehalusan menyebabkan perbedaan luas permukaan partikel yang berinteraksi dalam campuran. Kondisi tersebut dapat memengaruhi proses hidrasi, interaksi antarpartikel, pembentukan struktur mortar, serta perkembangan kekuatan. Tingkat kehalusan juga berpotensi memengaruhi waktu ikat karena perubahan luas permukaan partikel dapat memengaruhi proses interaksi material selama pengerasan. Dengan demikian, penggunaan *Fly Ash* dengan persentase yang sama belum tentu menghasilkan karakteristik mortar busa yang sama apabila tingkat kehalusannya berbeda.

Penelitian terdahulu mengenai penggunaan *Fly Ash* sebagai bahan substitusi pada mortar menunjukkan bahwa peningkatan kadar *Fly Ash* tidak selalu menghasilkan peningkatan kuat tekan secara terus-menerus. Azizah dkk. menunjukkan bahwa variasi *Fly Ash* sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% menghasilkan kuat tekan optimum pada kadar substitusi 15%. Hasil tersebut menunjukkan adanya kadar tertentu yang dapat memberikan kinerja optimum, sedangkan penambahan *Fly Ash* lebih lanjut dapat menyebabkan perubahan pada perkembangan kekuatan mortar. Meskipun penelitian mengenai variasi kadar *Fly Ash* telah dilakukan, kajian yang secara khusus menghubungkan tingkat kehalusan *Fly Ash* dengan karakteristik mortar busa masih relatif terbatas. Padahal, perbedaan tingkat kehalusan dapat memberikan respons yang berbeda terhadap waktu ikat dan perkembangan kuat tekan.

Sejumlah kajian sesungguhnya telah menyinggung keterkaitan antara karakteristik *Fly Ash* dan perilaku mortar, meskipun konteks yang diangkat berbeda dari fokus penelitian ini. Firdaus dkk. (2019) misalnya mengungkap bahwa tingkat kehalusan *Fly Ash* turut memengaruhi waktu ikat dan kuat tekan, namun kajian tersebut dilakukan pada mortar geopolimer yang mekanisme pengikatannya berbeda dari mortar busa berbasis semen Portland (Badan Standardisasi Nasional, 2015). Di sisi lain, Kearsley & Wainwright (2001) maupun Tangpagasit dkk. (2005) lebih menyoroti pengaruh kadar *Fly Ash* serta *packing effect*-nya terhadap kuat tekan pada *foamed concrete*, tanpa

mengelompokkan *Fly Ash* berdasarkan tingkat kehalusan secara sistematis. Dari uraian tersebut terlihat bahwa penelitian yang secara khusus memisahkan *Fly Ash* berdasarkan tingkat kehalusannya, sekaligus mengaitkannya dengan waktu ikat dan kuat tekan bebas pada mortar busa ber-*foam agent*, masih sulit ditemukan. Padahal, struktur berpori yang menjadi ciri khas mortar busa berpotensi membuat pengaruh luas permukaan partikel *Fly Ash* bekerja lebih kompleks dibandingkan pada mortar maupun beton konvensional. Kesenjangan inilah yang mendasari perlunya kajian yang lebih spesifik mengenai hubungan tingkat kehalusan *Fly Ash* dengan karakteristik mortar busa (Susilowati & Nabhan, 2021).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh tingkat kehalusan *Fly Ash* sebagai substitusi sebagian semen terhadap waktu ikat (*setting time*) dan kuat tekan bebas (*Unconfined Compressive Strength/UCS*) mortar busa. *Fly Ash* yang digunakan dikelompokkan berdasarkan *Fly Ash Filtering Based on Fall Zone* menjadi Zone 0, Zone 1, Zone 2, dan Zone 3. Pada setiap tingkat kehalusan digunakan variasi substitusi sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen. Pengujian *flow*, densitas basah, dan densitas kering digunakan sebagai parameter pendukung, sedangkan UCS diuji pada umur 28 hari dengan target kuat tekan sebesar 800 kPa. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kombinasi tingkat kehalusan dan persentase substitusi *Fly Ash* yang menghasilkan karakteristik mortar busa paling optimal serta mendukung pemanfaatan *Fly Ash* sebagai bahan substitusi sebagian semen (ASTM International, 1997).

Metode

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bina Darma Palembang. Material utama terdiri atas semen PCC Conch, pasir Tanjung Raja, air PAM, *Fly Ash* dari salah satu PLTU di Sumatera Selatan, dan foaming agent Ligno. *Fly Ash* dipisahkan berdasarkan tingkat kehalusan menggunakan alat Filtering of *Fly Ash* Based on Fall Zone menjadi Zona 0, Zona 1, Zona 2, dan Zona 3. Komposisi dasar campuran mortar busa mengacu pada proporsi tetap untuk setiap 1 m³ adukan, yaitu semen PCC Conch sebanyak 25,64 kg, air sebanyak 14,9 kg, pasir Tanjung Raja sebanyak 24,7 kg, dan *foam* Ligno sebanyak 47,4 liter, dengan kebutuhan *Fly Ash* sebesar 3,02 kg pada setiap variasi substitusi. Proporsi tersebut selanjutnya disesuaikan berdasarkan tingkat substitusi *Fly Ash* sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen, yang dikombinasikan dengan empat tingkat kehalusan *Fly Ash*, yaitu Zona 0, Zona 1, Zona 2, dan Zona 3.

Sebanyak 51 benda uji digunakan dengan cetakan silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Jumlah tersebut terdiri atas satu variasi kontrol tanpa substitusi *Fly Ash* sebanyak 3 benda uji, serta enam belas kombinasi variasi yang terbentuk dari empat tingkat kehalusan *Fly Ash* (Zona 0, Zona 1, Zona 2, dan Zona 3) dan empat tingkat substitusi (5%, 10%, 15%, dan

20%), yang masing-masing dibuat sebanyak 3 benda uji sebagai bentuk pengulangan pengujian, sehingga totalnya mencapai 48 benda uji. Keseluruhan 51 benda uji tersebut secara khusus diperuntukkan bagi pengujian kuat tekan bebas (UCS) pada umur 28 hari, sedangkan pengujian *flow*, densitas basah, dan waktu ikat dilakukan langsung pada adukan mortar segar sehingga tidak memerlukan pencetakan benda uji berbentuk silinder (Badan Standardisasi Nasional, 2014).

Pada setiap zona, *Fly Ash* mensubstitusi semen sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20%. Pengujian meliputi *flow*, densitas basah, *setting time* menggunakan alat Vicat mengacu pada ASTM C191-19, serta densitas kering dan UCS pada umur 28 hari. Data direkapitulasi, dirata-ratakan untuk setiap variasi, kemudian dibandingkan antar tingkat kehalusan dan persentase substitusi untuk menentukan kecenderungan dan variasi terbaik. Target penelitian ditetapkan pada UCS minimum 800 kPa dan densitas kering maksimum 0,6 g/cm³ sesuai kriteria yang digunakan dalam penelitian (ASTM International, 2019).

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik mortar segar

Hasil pengujian mortar segar menunjukkan bahwa nilai *flow* berada pada rentang 18,0–18,9 cm, sedangkan densitas basah berada pada rentang 0,739–0,746 g/cm³. Nilai *flow* kontrol sebesar 18,3 cm, sedangkan Zona 0, Zona 1, Zona 2, dan Zona 3 masing-masing sebesar 18,8; 18,9; 18,0; dan 18,0 cm. Densitas basah berturut-turut berada pada 0,741; 0,743; 0,746; 0,739; dan 0,741 g/cm³. Perbedaan antar zona relatif kecil, sehingga perubahan tingkat kehalusan tidak menunjukkan perubahan besar pada karakteristik mortar segar.

Tabel 1. Hasil pengujian *flow* dan densitas basah

Variasi	Flow (cm)	Densitas basah (g/cm ³)
Kontrol	18,3	0,741
Zona 0	18,8	0,743
Zona 1	18,9	0,746
Zona 2	18,0	0,739
Zona 3	18,0	0,741

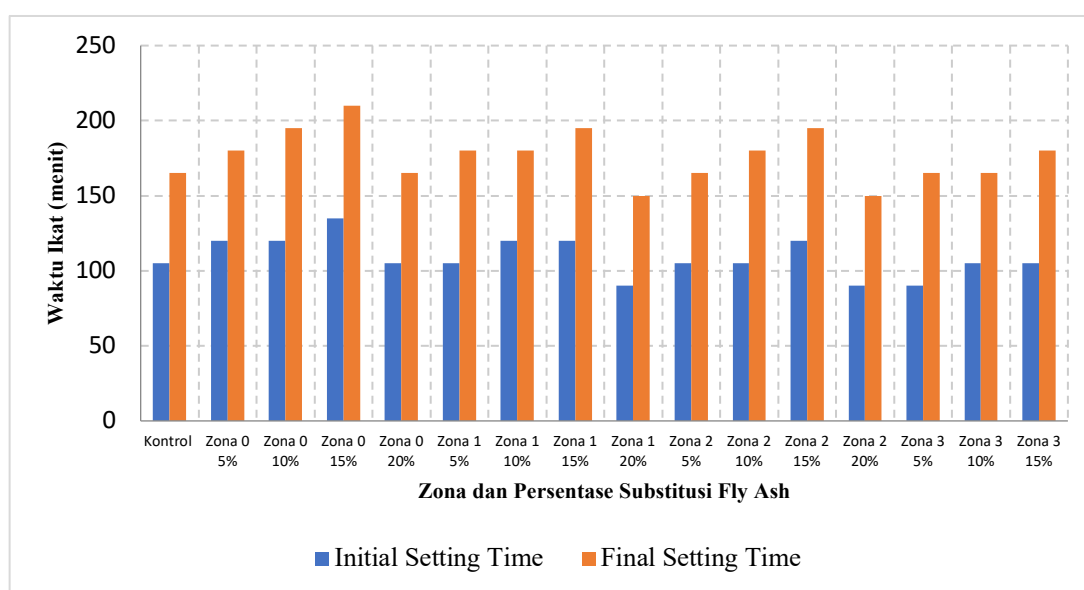
Setting time

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *Fly Ash* cenderung memperpanjang waktu ikat ketika persentase substitusi meningkat. Pada Zona 0, *initial setting time* meningkat dari 105 menit pada substitusi 5% menjadi 135 menit pada 20%, sedangkan *final setting time* meningkat dari 165 menjadi 210 menit. Pada Zona 1, *initial setting time* berada pada 105–120 menit dan *final setting time* 165–195 menit. Zona 2 menunjukkan *initial setting time* 90–120 menit dan *final setting time* 150–195 menit, sedangkan Zona 3 menunjukkan *initial setting time* 90–105 menit dan *final setting time* 150–180 menit. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa pengurangan jumlah semen akibat substitusi *Fly Ash* berhubungan dengan perlambatan waktu ikat. Sebaliknya, pada tingkat kehalusan yang lebih tinggi, waktu ikat cenderung lebih cepat. Hal

ini dapat dikaitkan dengan luas permukaan partikel yang lebih besar sehingga interaksi material menjadi lebih efektif (Firdaus dkk., 2019).

Tabel 2. Rekapitulasi *initial* dan *final setting time* (menit)

Zona	5% Initial/Final	10% Initial/Final	15% Initial/Final	20% Initial/Final
Kontrol	25 / 135	—	—	—
Zona 0	105 / 165	120 / 180	120 / 195	135 / 210
Zona 1	105 / 165	105 / 180	120 / 180	120 / 195
Zona 2	90 / 150	105 / 165	105 / 180	120 / 195
Zona 3	90 / 150	90 / 165	105 / 165	105 / 180



Gambar 1. Grafik Rekapitulasi *Initial Setting Time* dan *Final Setting Time*

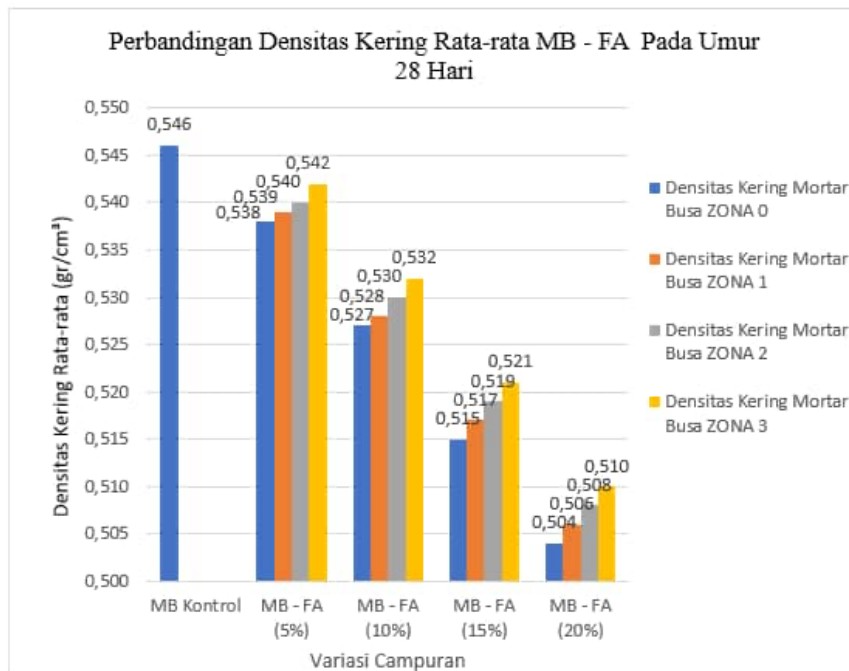
Secara keseluruhan, *initial setting time* variasi *Fly Ash* berada pada 90–135 menit dan *final setting time* 150–210 menit. Campuran kontrol memiliki *initial setting time* 25 menit dan *final setting time* 135 menit. Dengan demikian, seluruh variasi *Fly Ash* memiliki waktu ikat lebih panjang dibandingkan kontrol. Pola hasil memperlihatkan bahwa pengaruh *setting time* merupakan gabungan antara kadar substitusi dan tingkat kehalusan *Fly Ash*. Hasil ini juga sejalan dengan penggunaan ASTM C191-19 sebagai acuan pengujian waktu ikat serta penelitian Firdaus dkk. (2019) yang membahas hubungan tingkat kehalusan *Fly Ash* dengan *setting time*.

Densitas kering dan UCS umur 28 hari

Pada seluruh zona, densitas kering cenderung menurun ketika persentase substitusi *Fly Ash* meningkat. Pada Zona 0, densitas kering turun dari 0,538 g/cm³ pada 5% menjadi 0,504 g/cm³ pada 20%; pada Zona 1 dari 0,539 menjadi 0,506 g/cm³; pada Zona 2 dari 0,540 menjadi 0,508 g/cm³; dan pada Zona 3 dari 0,542 menjadi 0,510 g/cm³. Pola tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar substitusi memberikan kecenderungan penurunan densitas kering. Seluruh nilai masih berada di bawah batas 0,6 g/cm³ yang digunakan dalam penelitian.

Tabel 3. Rekapitulasi densitas kering umur 28 hari (g/cm^3)

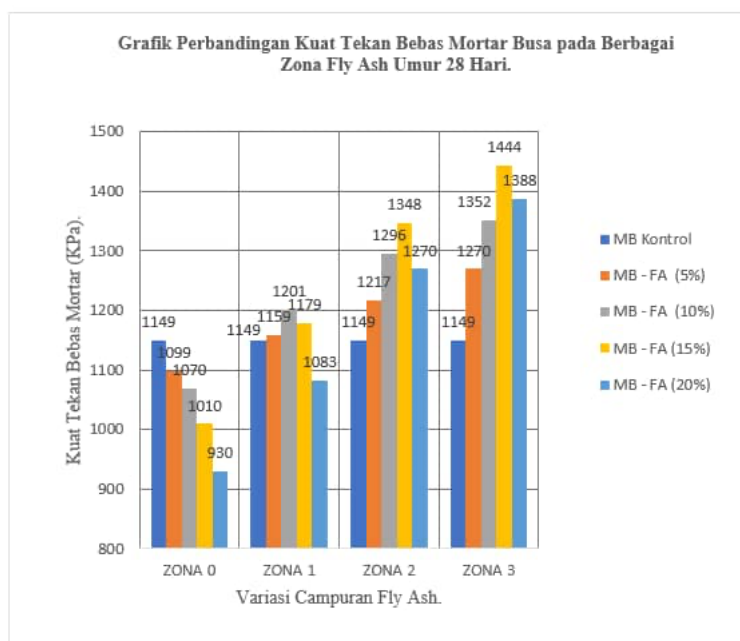
Variasi	Kontrol	5%	10%	15%	20%
Zona 0	0,546	0,538	0,527	0,515	0,504
Zona 1	0,546	0,539	0,528	0,517	0,506
Zona 2	0,546	0,540	0,530	0,519	0,508
Zona 3	0,546	0,542	0,532	0,521	0,510

**Gambar 2. Grafik Perbandingan Densitas Kering Rata-rata Kontrol dan Variasi Zona (0-3)**

Pola UCS berbeda pada setiap zona. Zona 0 menunjukkan penurunan kuat tekan seiring bertambahnya substitusi, dari 1.099 kPa pada 5% menjadi 930 kPa pada 20%. Zona 1 meningkat hingga 10%, dengan nilai 1.201 kPa, kemudian menurun menjadi 1.083 kPa pada 20%. Zona 2 dan Zona 3 meningkat hingga 15%, masing-masing mencapai 1.348 kPa dan 1.444 kPa, kemudian menurun pada 20%. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan *Fly Ash* tidak selalu meningkatkan kekuatan secara linear. Pengaruh tersebut berkaitan dengan kombinasi kadar substitusi dan tingkat kehalusan, sedangkan efek pengisian dan reaksi pozzolanik dapat berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan pada kadar tertentu (Azizah dkk., 2022; Tangpagasit dkk., 2005).

Tabel 4. Rekapitulasi UCS umur 28 hari (kPa)

Variasi Campuran	ZONA 0	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3
MB Kontrol	1149	1149	1149	1149
MB - FA (5%)	1099	1159	1217	1270
MB - FA (10%)	1070	1201	1296	1352
MB - FA (15%)	1010	1179	1348	1444
MB - FA (20%)	930	1083	1270	1388



Gambar 3. Grafik Perbandingan Kuat Tekan Bebas MB – FA Variasi Zona

Nilai UCS tertinggi diperoleh pada Zona 3 dengan substitusi 15%, yaitu 1.444 kPa. Dibandingkan kontrol sebesar 1.149 kPa, nilai tersebut menunjukkan peningkatan sekitar 25,7%. Setelah mencapai 15%, UCS menurun menjadi 1.388 kPa pada substitusi 20%. Kecenderungan peningkatan pada *Fly Ash* yang lebih halus menunjukkan bahwa tingkat kehalusan dan kadar substitusi perlu dipertimbangkan secara bersamaan. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa variasi kehalusan yang digunakan dalam penelitian memberikan respons yang berbeda pada setiap kadar substitusi, sehingga tidak tepat menyatakan bahwa kenaikan kehalusan selalu meningkatkan UCS pada semua kadar (Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan, 2021).

Secara keseluruhan, seluruh variasi memenuhi persyaratan yang digunakan dalam penelitian, yaitu densitas kering maksimum 0,6 g/cm³ dan UCS minimum 800 kPa. Dengan demikian, variasi Zona 3 dengan substitusi 15% merupakan variasi yang memberikan nilai UCS tertinggi sekaligus tetap memenuhi kriteria material ringan yang digunakan.

Kesimpulan

(Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar substitusi *Fly Ash* cenderung memperpanjang waktu ikat, sedangkan peningkatan kehalusannya justru mempercepatnya, dengan *initial setting time* berkisar 90–135 menit dan *final setting time* 150–210 menit. Pengaruh kehalusan juga terlihat pada perkembangan kuat tekan: Zona 0 terus menurun seiring bertambahnya substitusi, Zona 1 optimum pada 10%, sementara Zona 2 dan Zona 3 optimum pada 15%, dengan nilai tertinggi 1.444 kPa pada Zona 3. Seluruh variasi tetap memenuhi kriteria mortar busa ringan, yaitu densitas kering di bawah 0,6 g/cm³ dan kuat tekan di atas 800 kPa.

Temuan ini menegaskan bahwa tingkat kehalusan dan kadar substitusi *Fly Ash* perlu dipertimbangkan secara bersamaan dalam merancang komposisi mortar busa yang optimal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah SWT atas segala kemudahan dan kelancaran yang diberikan selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing dan dosen penguji yang telah memberikan arahan, masukan, serta bimbingan dalam penyelesaian penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada keluarga, pihak laboratorium, dan semua pihak yang telah memberikan dukungan serta bantuan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini.

Referensi

- ASTM International. (1997). ASTM C33/C33M-97: Standard Specification for Concrete Aggregates. *West Conshohocken, PA: ASTM International*.
- ASTM International. (2019). ASTM C191-19: Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. *West Conshohocken, PA: ASTM International*.
- Azizah, T., Wahyuni, A. S., Islam, M., Gunawan, A., & Afrizal, Y. (2022). Pengaruh Penggunaan Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Bahan Tambah Terhadap Kuat Tekan Mortar. *Inersia: Jurnal Teknik Sipil*, 14(1), 28–34. <https://doi.org/10.33369/ijts.14.1.28-34>
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). SNI 2460:2014: Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton. *Jakarta: Badan Standardisasi Nasional*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 2049:2015 Semen Portland. *Jakarta: Badan Standardisasi Nasional*.
- Firdaus, Rosidawani, & Yunus, I. (2019). The effects of fineness level of fly ash and accelerator on the setting time and the compressive strength of geopolymer mortar. *Journal of Physics: Conference Series*, 1376(1), 12008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1376/1/012008>
- Kearsley, E. P., & Wainwright, P. J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(1), 105–112. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00430-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00430-0)
- Prasetya, A. R., & Solikin, I. M. (2024). Analisis Pengaruh Perbandingan Variasi Proporsi Agregat Halus Terhadap Sifat Mekanik Mortar Busa Fly Ash Pada Pengaplikasian Bata Ringan. In *Universitas Muhammadiyah Surakarta*. <https://eprints.ums.ac.id/119709/>
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan. (2021). *Spesifikasi Khusus Interim Material Ringan Mortar Busa (SKh-1.7.21)*.
- Shankar, A. N., Chopade, S., Srinivas, R., Kumar Mishra, N., Eftikhaar, H. K., Sethi, G., & Singh, B. (2023). Physical and mechanical properties of foamed concrete, a literature review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.105>
- Susilowati, A., & Nabhan, F. (2021). Pengaruh variasi faktor air semen terhadap mortar busa. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering*, 1(2), 9–15. <https://doi.org/10.31963/jacee.v2i1.2797>
- Susilowati, A., Satria, K. M., & Pratikto, P. (2024). Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Substitusi Sebagian Semen pada Papan Serat Ringan. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 82. <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/12143>
- Tangpagasit, J., Cheerarat, R., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2005). Packing effect and pozzolanic reaction of fly ash in mortar. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1145–1151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.030>