

Durabilitas beton yang mengandung agregat ringan buatan berbahan dasar abu terbang (*fly ash*)

Ditya Hafiz Rosyidi¹, Mohammad Sulton¹, Puput Risdanareni^{1,*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang, Malang, Jawa Timur Indonesia

*Corresponding authors: puput.risdanareni.ft@um.ac.id

Submitted: 23 August 2023, Revised: 17 June 2024, Accepted: 18 June 2024

ABSTRACT: The low fly ash consumption in Indonesia needs to be tackled in order to avoid the pilling of this material. Employing this material as a raw material to produce lightweight aggregate becomes an alternative solution to increase the fly ash consumption, as the aggregate has high portion in the concrete mixture. However, as lightweight aggregate has high porosity, its durability especially in term of water uptake in aggressive environment need to be investigated. Thus, this research aims to observe the durability of concrete containing fly ash-based lightweight aggregate (FA LWA) in salt environment. The Salt environment was mimicked with Sodium chloride and sodium sulfate solution. The FA and EC LWA were used as coarse aggregate replacement with replacement rate 50 and 100% by volume. The physical, mechanical and durability properties of concrete were assessed by conducting the bulk density, compressive strength test and capillary water absorption rate in salt environment. The result shows that the bulk density is inversely proportional to the percentage of LWA content used. In addition, from the concrete capillary water absorption test showed that concrete containing FA LWA obtained a higher absorption value than control concrete. Based on the results of the capillary absorption test using different solutions, it showed that FA LWA concrete was more resistant in an alkaline environment or containing salt solution (NaCl). The results of this study contribute to a new breakthrough that fly ash consumption can be improved by transforming fly ash into artificial lightweight aggregate that has high resistance in marine environment.

KEYWORDS: capillary water uptake; concrete; durability; fly ash; lightweight aggregate; salt environment.

ABSTRAK: Rendahnya konsumsi *fly ash* di Indonesia perlu diatasi untuk menghindari penimbunan material ini. Penggunaan bahan ini sebagai bahan baku untuk memproduksi agregat ringan menjadi salah satu solusi alternatif untuk meningkatkan konsumsi *fly ash*, karena agregat ini memiliki porsi yang cukup tinggi dalam campuran beton. Namun, karena agregat ringan memiliki porositas yang tinggi, maka daya tahan agregat ringan terutama dalam hal penyerapan air di lingkungan yang agresif perlu diteliti. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui durabilitas beton yang mengandung *fly ash-based lightweight aggregate* (FA LWA) di lingkungan garam. Lingkungan garam ditirukan dengan larutan natrium klorida dan natrium sulfat. Pada produksi beton, agregat kasar disubsitusi dengan FA dan EC LWA dengan kadar penggantian 50 dan 100%. Selanjutnya sifat fisik, mekanik dan durabilitas beton dinilai dengan melakukan uji berat jenis, kuat tekan dan kecepatan kapiler di lingkungan garam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa berat jenis berbanding terbalik dengan persentase kandungan LWA yang digunakan. Selain itu, dari hasil uji serapan air kapiler beton menunjukkan bahwa beton yang mengandung FA LWA memperoleh nilai serapan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton kontrol. Berdasarkan hasil uji serapan air kapiler dengan menggunakan larutan yang berbeda, menunjukkan bahwa beton FA LWA lebih tahan dalam lingkungan basa atau mengandung larutan garam (NaCl). Hasil penelitian ini berkontribusi memberi terobosan baru bahwa konsumsi *fly ash* dapat ditingkatkan dengan mentransformasi *fly ash* menjadi agregat ringan buatan yang memiliki ketahanan tinggi di lingkungan air laut.

KATA KUNCI: serapan air kapiler; beton; durabilitas; abu terbang; agregat ringan; lingkungan basa.

© The Author(s) 2024. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Menurut laporan kementerian ESDM tahun 2022, Indonesia memiliki 230 PLTU yang tersebar di seluruh negeri. Dengan tingginya jumlah PLTU di Indonesia, ketersediaan *fly ash* sebagai produk samping dari PLTU juga sangat tinggi. Akan tetapi tinggi nya produk *fly ash* ini tidak diiringi dengan tinggi nya tingkat konsumsi *fly ash*. Tingkat konsumsi *domestic fly ash* dilaporkan hanya mencapai 12% per tahun (Ekaputri et al., 2020). Jika tidak ada usaha peningkatan konsumsi

fly ash, maka *fly ash* hanya menjadi landfill yang akan mencemari air tanah dan lingkungan.

Penggunaan *fly ash* sebagai material konstruksi sudah dilakukan oleh banyak peneliti sebelumnya (Balapour et al., 2022; Ekaputri & Triwulan, 2013; Hardjito, 2005; Luo et al., 2021; Paudel et al., 2020; Promsawat et al., 2020; Risdanareni et al., 2020). Akan tetapi, para peneliti kebanyakan hanya fokus pada penggunaan *fly ash* sebagai material pengganti semen dalam pembuatan beton. Padahal semen hanya

memiliki pori maksimal 25% dalam matrik beton. Salah satu upaya untuk meningkatkan konsumsi *fly ash* ialah mentransformasi material ini menjadi agregat ringan buatan (LWA) yang dapat digunakan sebagai pengganti agregat yang memiliki pori hampir 75 % dalam matrik beton. Penelitian tentang pemanfaatan *fly ash* sebagai agregat ringan buatan dengan metode granulasi dan menggunakan binder utama semen telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Geetha & Ramamurthy, 2013; Kourti & Cheeseman, 2010; Risdanareni et al., 2017, 2020; Tang et al., 2017a; Tang & Brouwers, 2017b; Zhang et al., 2017). Akan tetapi kebanyakan peneliti hanya fokus pada peningkatan kuat tekan dengan benda uji mortar (kecil). Mengingat keberadaan agregat ringan buatan berbahan dasar *fly ash* (FA LWA) ini memiliki kecenderungan untuk meningkatkan jumlah pori dalam beton, pengujian durabilitas beton yang dihasilkan sangat dibutuhkan. Mengusung tujuan untuk menutup riset gap berupa investigasi durabilitas beton bermuatan FA LWA, dilakukanlah riset yang fokus pada pengujian durabilitas beton bermuatan FA LWA di lingkungan garam/ air laut. Selain itu, dalam penelitian ini agregat ringan buatan komersil berupa *expanded clay lightweight aggregate* (EC LWA) ditambahkan juga ke dalam matrik beton sebagai pembanding dan melihat kelayakan FA LWA untuk bersaing di pasar.

Berdasarkan pentingnya dilakukannya penelitian tentang uji durabilitas beton bermuatan FA LWA seperti yang telah dijabarkan diatas, diharapkan FA LWA dapat dijadikan sebuah Solusi untuk meningkatkan konsumsi *fly ash* yang masih rendah di Indonesia. Selain itu diharapkan keberadaan FA LWA ke dalam campuran beton tidak menyebabkan penurunan kinerja durabilitas beton terutama ketika terpapar kondisi basa.

2 METODOLOGI

2.1 Material

Fly ash yang digunakan adalah *fly ash* kelas F dari PT Petrokimia Gresik. Semen PPC dari PT Tigaroda digunakan sebagai binder. Batu pecah dengan ukuran butiran maksimum 40 mm dan pasir dengan zona gradasi 2 digunakan sebagai agregat alami.

2.2 Produksi LWA

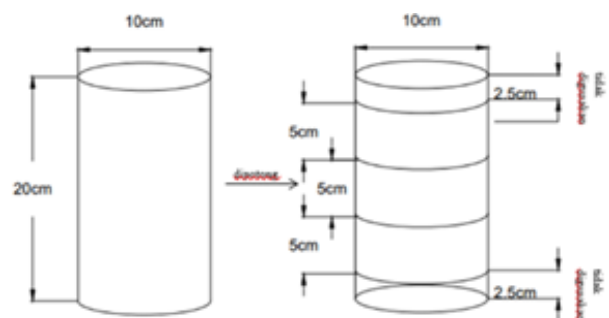
FA LWA diproduksi dengan mencampurkan *fly ash* dan air dengan proporsi 4:1 ke dalam pan granulator. Kemiringan pan granulator ialah 45° dan pan granulator diputar dengan kecepatan 60 rpm selama kurang lebih 20 menit. Selanjutnya FA LWA dikeringkan pada suhu ruangan selama 24 jam untuk kemudian ditempatkan pada *plastic sealed bag* selama 28 hari.

2.3 Karakterisasi LWA

Selanjutnya dilakukan uji resapan air, berat jenis, dan berat volume dari LWA, pasir dan kerikil sesuai dengan standard SNI. *Aggregate impact value* (AIV) tes juga dilakukan untuk menguji kuat hancur agregat kasar (batu pecah, FA LWA dan EC LWA).

2.4 Pembuatan Benda Uji Beton

Sampel dari penelitian ini menggunakan benda uji yang dibuat menjadi 5 jenis variasi berdasarkan kadar persentase penggunaan agregat ringan buatan berbahan dasar *fly ash*. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berukuran 10 cm x 20 cm yang nantinya akan dipotong hingga berukuran 10 cm x 5 cm, sedangkan sisa 2.5 cm pada bagian atas dan bawah beton tidak digunakan (Gambar 1).



Gambar 1. Detail benda uji beton silinder

Pada penelitian ini menggunakan *mix design* sesuai dengan perencanaan beton normal dengan kuat tekan mencapai 25 MPa pada umur 28 hari, sehingga didapatkan komposisi campuran pada Tabel 1. Sebelum dicampurkan kedalam campuran beton, LWA dibuat dalam kondisi SSD (*saturated surface dry*) agar tidak menyerap air bebas yang ada.

Tabel 1. Mix desain untuk 1m³ beton

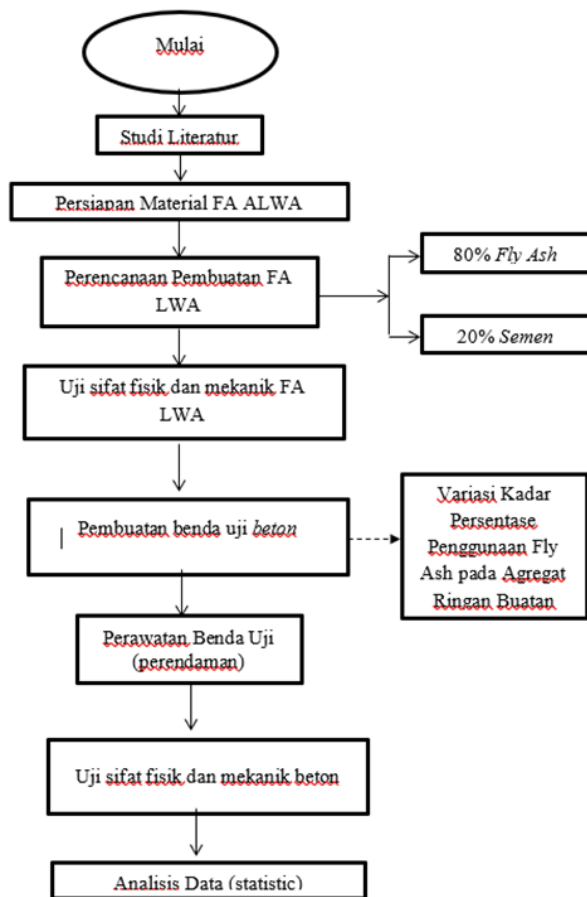
Bahan	Kadar LWA (kg)		
	0%	50%	100%
Semen	350	350	350
Air	210	210	210
Pasir	644	644	644
Batu pecah	1196	607.36	-
FA LWA	-	460.20	920.36
EC LWA	-	266.30	532.60

2.5 Uji Sifat Fisik dan Mekanik Beton

Pengujian sifat fisik dan mekanik beton dilakukan pada kondisi segar dan keras. Pada kondisi segar uji slump dilakukan sesuai dengan SNI 1972:2008. Pengujian kuat tekan beton usia 28 hari dilakukan sesuai dengan SNI 1974:2011.

2.6 Uji Durabilitas Beton

Uji durabilitas berupa uji serapan air kapiler dilakukan pada beton yang berusia 28 hari sesuai dengan EN 1015-10. Uji serapan air kapiler dilakukan pada tiga lingkungan yaitu air, NaCl, dan Na₂SO₄. Larutan sodium klorida 3.5 % dan sodium sulfat berkonsentrasi 0.5 % diterapkan pada penelitian ini. Sebagai rangkuman, diagram alir penelitian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Bahan

Pengujian bahan pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai spesifikasi dari material yang akan digunakan. Bahan material yang digunakan harus sesuai dengan spesifikasi yang disyaratkan.

Hasil pengujian material yang telah dilakukan didapatkan nilai material sesuai dengan jenis pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 sampai dengan Tabel 6. Pengujian ini berfungsi untuk melihat spesifikasi tiap material agar diketahui sesuai dengan yang disyaratkan. Persyaratan yang digunakan tiap properties sesuai dengan SNI.

Berdasarkan hasil pengujian berat volume, FA LWA memenuhi persyaratan dari ASTM C330 terkait berat volume *aggregate* ringan buatan yang diijinkan

yaitu kurang dari 1200 kg/m³. Terhadap hasil penelitian terdahulu berat jenis FA LWA cukup selaras yaitu antara 1.7-1.9 (Gesoğlu et al., 2007, 2013; Güneyisi et al., 2013; Thomas & Harilal, 2015)

Tabel 2. Pengujian bahan agregat halus

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Modulus kehalusan	2.82
2	Analisa saringan	Zona 2
3	Berat jenis	2.5
4	Berat volume (gr/cm ³)	1.50

Tabel 3. Pengujian bahan agregat kasar

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Modulus kehalusan	7.01
2	Berat jenis	2.60
3	Kadar air (%)	12.4
4	Berat volume (gr/cm ³)	1.2
5	Impact value (%)	19.9

Tabel 4. Pengujian bahan agregat buatan FA LWA

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Berat jenis	1.90
2	Kadar air (%)	23.15
3	Berat volume (gr/cm ³)	0.915
4	Impact value (%)	56.3

Tabel 5. Pengujian bahan agregat buatan EC LWA

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Berat jenis	1.14
2	Kadar air (%)	20.65
3	Berat volume (gr/cm ³)	0.345
4	Impact value (%)	52

Tabel 5. Pengujian Bahan Semen

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Berat jenis	2.96
2	Uji konsistensi (%)	25.5
3	Waktu ikat (menit)	75

3.2 Pengujian Slump Beton

Hasil pengujian slump ditunjukkan pada Tabel 6 didapatkan nilai slump yang sesuai berdasarkan rencana pada *mix design* beton yang tertera pada tabel 6 sebesar 30-60 mm. Penambahan FA dan LWA

bertendensi untuk menurunkan nilai slump. Hal ini kemungkinan disebabkan karena LWA masih belum dalam kondisi jenuh total ketika dimasukkan ke dalam campuran beton, sehingga LWA masih menyerap air yang ada digunakan untuk memproduksi beton. Kondisi serupa juga terjadi ketika menambahkan bottom ash LWA ke dalam campuran beton (Illikainen, 2017; Tang & Brouwers, 2017a). Akan tetapi penurunan slump beton yang terjadi akibat penambahan LWA masih berada di batas wajar.

Tabel 6. Hasil uji *slump* beton

No	Kode Benda Uji	Nilai <i>Slump</i>
1	CONTROL	50 mm
2	100% FA	32 mm
3	50% FA	44 mm
4	100% EC	37 mm
5	50% EC	46 mm

3.3 Pengujian Berat Volume Beton

Pengujian berat volume beton dilakukan pada kelima jenis variasi campuran pada beton normal, benda uji yang digunakan berukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Data hasil pengujian berat volume beton disajikan pada Gambar 3.

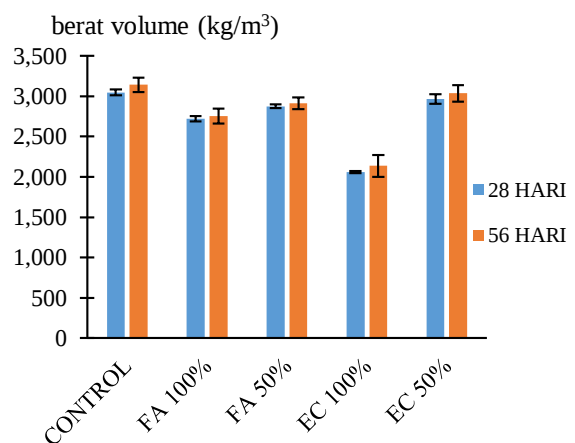
Beton CONTROL mendapatkan nilai berat volume beton paling tinggi dibanding beton lainnya, dengan berat volume sebesar 3046.96 kg/m³ pada umur 28 hari dan 3143.77 kg/m³ pada umur 56 hari. Sehingga didapatkan pada umur 28 hari nilai berat volume beton CONTROL lebih besar 10.69% dari FA100, lebih besar 5.63% dari FA50, lebih besar 32.45% dari berat volume EC100, lebih besar 2.65% dari berat volume EC50. Pada umur 56 hari nilai berat volume CONTROL lebih besar 12.47% dari FA100, lebih besar 7.33 % dari FA50, lebih besar 32.05% dari EC100, lebih besar 3.38% dari EC50. Hal ini terjadi dikarenakan LWA FA dan EC lebih ringan dibanding agregat kasar alami. Secara statistik berat volume beton CONTROL terdapat perbedaan yang signifikan dengan beton lainnya tiap variasi pada berbagai usia, terkecuali antara beton CONTROL dengan beton EC50 pada umur 56 hari tidak terdapat perbedaan berat volume yang signifikan.

Pada penelitian (Nurjaman et al., 2021) beton yang menggunakan fly ash dengan prosentase 50% dan 100% sebagai pengganti agregat kasar berturut turut menghasilkan berat volume beton sebesar 2226.94 kg/m³ dan 2282.30 kg/m³. Penelitian lainnya yaitu oleh (Tang et al., 2017b) menggunakan campuran fly ash dan bottom ash sebagai pengganti agregat kasar menghasilkan berat volume beton sebesar 2323-2358 kg/m³. Sementara penelitian (Risdanareni et al., 2021) menggunakan mortar dengan campuran FA LWA dan campuran alkali activator didapatkan nilai berat

volume mortar sebesar 2313.98 kg/m³. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang juga menggunakan campuran *fly ash* sebagai pengganti agregat kasar, berat volume beton dalam penelitian ini memiliki nilai yang lebih tinggi sebesar 2721.43 kg/m³ untuk beton FA100 dan 2875.41 kg/m³ untuk beton FA50.

Pengaruh usia beton berbanding lurus dengan nilai berat volume yang dihasilkan, semakin lama usia beton saat pengujian maka berat volume yang diperoleh semakin tinggi pada berbagai sampel. Didapatkan rata-rata berat volume beton pada umur 56 hari lebih besar 2.30% daripada beton umur 28 hari.

Menurut (BSN, 1991) beton normal memiliki nilai berat volume minimal sebesar 2200 kg/m³, sehingga dari kelima sampel pada benda uji yaitu CONTROL, FA100, FA50, EC100 dan EC50 yang memenuhi syarat adalah beton CONTROL, FA100, FA50 dan EC50 pada berbagai usia.



Gambar 3. Berat volume pada berbagai usia. *Error bar* mempresentasikan standard deviasi (n=4)

3.4 Pengujian Kuat Tekan Beton

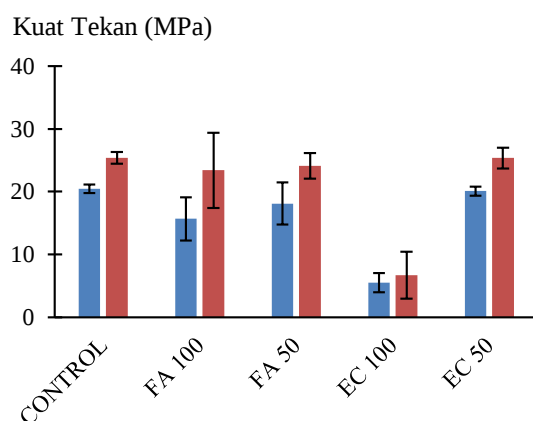
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar beban yang dapat ditahan oleh beton normal (P) dengan berbagai variasi campuran hingga beton hancur. Pengujian kuat tekan dilakukan saat beton berumur 28 hari dan 56 hari pada benda uji silinder dengan rencana ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Data hasil kuat tekan benda uji dengan variasi campuran yang tertera berdasarkan umur benda uji disajikan pada Gambar 4.

Didapatkan kuat tekan beton berbanding lurus dengan usia beton saat pengujian, semakin lama umur pengujian semakin besar nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini dibuktikan dari dengan bertambahnya kuat tekan beton CONTROL, FA 100, FA 50, EC 100, dan EC 50 dari umur 28 hari hingga 56 hari. Peningkatan kuat tekan berturut turut sebesar 19.20%, 32.95%, 24.81%, 18.13%, dan 20.75%.

Peningkatan kuat tekan terbesar didapatkan oleh kode benda uji FA 100. Hal ini juga dibuktikan pada penelitian (Salain, 2021) bahwa terjadinya peningkatan kuat tekan dikarenakan perbaikan dari sifat mekanik dan fisik dengan bertambahnya waktu *curing*, dapat dipahami bahwa dengan meningkatnya waktu curing serta perawatan yang baik dapat berpengaruh dalam intensitas karakter perekat yaitu semen bertambah dalam beton. Sehingga seiring pertambahannya waktu mengakibatkan ikatan antara agregat dan perekat menjadi lebih kuat dan porositas berkurang.

Menurut (BSN, 2019) persyaratan kuat tekan beton normal yaitu antara sebesar 17 MPa hingga 30 MPa, sehingga pada pengujian ini beton yang memenuhi syarat adalah beton dengan kode benda uji CONTROL pada umur 28 hari dan 56 hari, FA 100 pada umur 56 hari, FA 50 pada umur 56 hari, dan EC 50 pada umur 28 hari dan 56 hari.

Hasil penelitian (Tang et al., 2017b) yang menggunakan rasio penggantian agregat ringan buatan berbahan *fly ash* 50% dan 100% dari total volume agregat kasar dalam beton dikatakan terjadi penurunan kuat tekan beton dari prosentase 50% ke 100% sebesar 25.34%. Dapat disimpulkan jika dibandingkan dengan kuat tekan pada penelitian (Tang et al., 2017b), kuat tekan dalam penelitian ini memiliki nilai yang lebih rendah, namun didapatkan penurunan kuat tekan dari prosentase 50% ke 100% yang lebih kecil hanya sebesar 13.41% pada umur 28 hari. Hal itu menandakan terdapat kesamaan bahwa semakin tinggi prosentase LWA yang digunakan dapat menurunkan nilai kuat tekan yang dihasilkan.



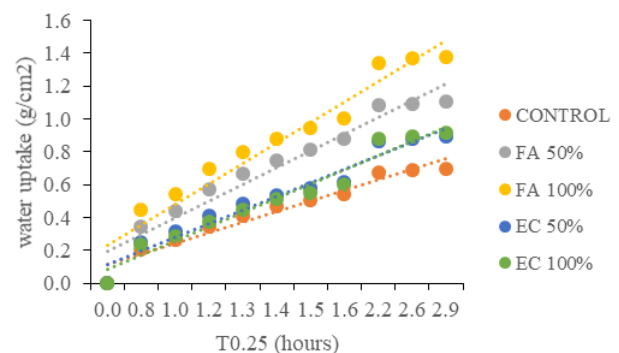
Gambar 4. Kuat tekan pada berbagai usia. Error bar mempresentasikan standard deviasi (n=4)

3.5 Durabilitas Beton

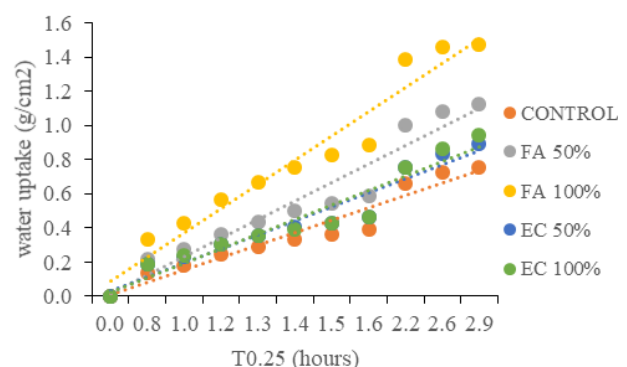
Aspek durabilitas beton diukur dengan dilakukan uji air serapan kapiler. Hasil uji air serapan kapiler di lingkungan air, NaCl dan Na₂SO₄ pada usia beton 28 hari ditampilkan pada Gambar 5, 6 dan 7. Dari hasil uji air serapan kapiler dapat disimpulkan bahwa laju penyerapan kapiler pada berbagai variasi benda uji

penyerapan NaCl memiliki nilai laju penyerapan terendah dibanding penyerapan air maupun Na₂SO₄.

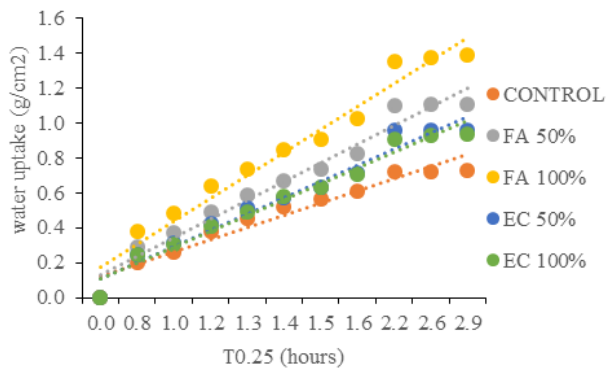
Pada penelitian (De Brabandere et al., 2022) didapatkan nilai penyerapan kapiler paling rendah berada pada larutan Na₂SO₄ dibanding pada penyerapan air dan NaCl kapiler dikarenakan sulfat yang dihasilkan Na₂SO₄ dapat menutup pori beton, sedangkan pada penelitian ini nilai penyerapan kapiler paling rendah dihasilkan oleh penyerapan yang menggunakan larutan NaCl pada sampel yang menggunakan LWA pada berbagai usia. Selain itu terdapat perbedaan pada metode pengujian penyerapan air kapiler yang dilakukan, pada penelitian (De Brabandere et al., 2022) benda uji saat penyerapan air kapiler ditutup menggunakan *aluminium foil*, sedangkan pada penelitian ini benda uji untuk penyerapan air kapiler tidak dilapisi/ditutup menggunakan *aluminium foil*. Perbedaan nilai penyerapan terendah dapat terjadi karena penelitian (De Brabandere et al., 2022) hanya menggunakan beton CONTROL tidak menggunakan beton dengan agregat ringan buatan, sehingga hasil yang didapatkan berbeda. Terkecuali pada beton CONTROL nilai penyerapan kapiler pada penelitian ini sama dengan penelitian (De Brabandere et al., 2022) yaitu paling rendah diperoleh penyerapan kapiler dengan larutan Na₂SO₄.



Gambar 5. Hasil uji serapan air kapiler beton



Gambar 6. Hasil uji serapan NaCL kapiler beton



Gambar 6. Hasil uji serapan Na_2SO_4 kapiler beton

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji yang telah dilakukan, secara umum dapat disimpulkan bahwa agregat ringan berbahan dasar *fly ash* (FA LWA) sebagai pengganti agregat kasar dengan maksimum penggantian 50 % dalam pembuatan beton tidak secara signifikan menurunkan sifat mekanik maupun fisik beton. Sifat fisik dan mekanik beton bermuatan FA LWA juga hampir setara bahkan lebih baik dari beton bermuatan EC LWA. Durabilitas beton bermuatan FA LWA di lingkungan basa (NaCl) juga lebih baik dibandingkan dengan benda uji control. Hal ini diindikasikan dengan lebih lambatnya laju kapiler beton bermuatan FA LWA dibanding dengan benda uji control. Berdasarkan hasil penelitian ini, mentransformasi *fly ash* menjadi bahan bangunan bernilai tinggi bernama agregat ringan dapat menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan rendahnya konsumsi *fly ash* di Indonesia. Dengan hasil durabilitas yang cukup baik beton bermuatan FA LWA dapat dipertimbangkan sebagai material substitusi untuk infrastruktur laut di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Malang atas dukungan finansial melalui pendanaan penelitian hibah skripsi dengan dana internal Universitas Negeri Malang.

DAFTAR PUSTAKA

- Balapour, M., Khaneghahi, M. H., Garboczi, E. J., Hsuan, Y. G., Hun, D. E., & Farnam, Y. (2022). Off-spec fly ash-based lightweight aggregate properties and their influence on the fresh, mechanical, and hydration properties of lightweight concrete: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 342, 128013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128013>
- BSN. (1991). *SK SNI T-15-1991-03 tentang Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN. (2019). *SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- De Brabandere, L., Alderete, N. M., & De Belie, N. (2022). Capillary Imbibition in Cementitious Materials: Effect of Salts and Exposure Condition. *Materials*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ma15041569>
- Ekaputri, J. J., Shahib, M., & Bari, A. (2020). Perbandingan Regulasi Fly Ash sebagai Limbah B3 di Indonesia dan Beberapa Negara. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(2), 150–162.
- Ekaputri, J. J., & Triwulan, T. (2013). Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 1. <https://doi.org/10.5614/jts.2013.20.1.1>
- Geetha, S., & Ramamurthy, K. (2013). Properties of geopolymerised low-calcium bottom ash aggregate cured at ambient temperature. *Cement and Concrete Composites*, 43, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.007>
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Alzebaree, R., & Mermerdaş, K. (2013). Effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of the concretes produced with cold bonded fly ash aggregates. *Construction and Building Materials*, 40, 982–990. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.074>
- Gesoğlu, M., Özturan, T., & Güneyisi, E. (2007). Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 21(9), 1869–1878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.038>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö., & Mermerdaş, K. (2013). Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates. *Composites Part B: Engineering*, 53, 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.070>
- Hardjito, D. (2005). Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Curtin University of Technology*, November, 94. <https://doi.org/10.1177/1049909113506980>
- Illikainen, Y. P. F. T. (2017). Development and incorporation of lightweight waste-based geopolymer aggregates in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 131, 784–792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.017>
- Kourti, I., & Cheeseman, C. R. (2010). Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from lignite coal fly ash and recycled glass. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 769–775. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.006>
- Luo, Z., Li, W., Wang, K., Castel, A., & Shah, S. P. (2021). Comparison on the properties of ITZs in fly ash-based geopolymer and Portland cement concretes with equivalent flowability. *Cement and Concrete Research*, 143(February), 106392. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106392>
- Nurjaman, B. Z., Roestaman, R., & Walujodjati, E. (2021). Pengaruh Penggunaan Agregat Abu Batu Sebagai Pengganti Agregat Halus Alami Terhadap Sifat-Sifat Beton. *Jurnal Konstruksi*, 19(1), 31–42. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.19-1.890>
- Paudel, S. R., Yang, M., & Gao, Z. (2020). pH Level of Pore Solution in Alkali-Activated Fly-Ash Geopolymer Concrete and Its Effect on ASR of Aggregates with Different Silicate Contents. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020257. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003344](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003344)
- Promsawat, P., Chatveera, B., Sua-iam, G., & Makul, N. (2020). Properties of self-compacting concrete prepared with ternary Portland cement-high volume fly ash-calcium carbonate blends. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00426. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00426>
- Risdanareni, P., Choiri, A. A., Djatmika, B., & Puspitasari, P. (2017). Effect of the Use of Metakaolin Artificial Lightweight Aggregate on the Properties of Structural Lightweight Concrete. *Civil Engineering Dimension*, 19(2), 86–92. <https://doi.org/10.9744/ced.19.2.86-92>

- Risdanareni, P., Van den Heede, P., Wang, J., & De Belie, N. (2021). The durability of mortar containing alkali activated fly ash-based lightweight aggregate. *Materials*, 14(13). <https://doi.org/10.3390/ma14133741>
- Risdanareni, P., Villagran, Y., Schollbach, K., Wang, J., & de Belie, N. (2020). Properties of alkali activated lightweight aggregate generated from Sidoarjo Volcanic Mud (Lusi), fly ash, and municipal solid waste incineration bottom ash. *Materials*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ma13112528>
- Salain, I. M. A. K. (2021). Kekuatan dan Permeabilitas Beton Abu Terbang Volume Tinggi. *Jurnal Teknik Sipil*, 28(2), 133–142. <https://doi.org/10.5614/jts.2021.28.2.2>
- Tang, P., & Brouwers, H. J. H. (2017b). Integral recycling of municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash fines (0–2 mm) and industrial powder wastes by cold-bonding pelletization. *Waste Management*, 62, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.028>
- Tang, P., Florea, M. V. A., & Brouwers, H. J. H. (2017a). Employing cold bonded pelletization to produce lightweight aggregates from incineration fine bottom ash. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1371–1384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.234>
- Thomas, J., & Harilal, B. (2015). Cement & Concrete Composites Properties of cold bonded quarry dust coarse aggregates and its use in concrete. *CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*, 62, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.05.005>
- Zhang, L., Zhang, Y., Liu, C., Liu, L., & Tang, K. (2017). Study on microstructure and bond strength of interfacial transition zone between cement paste and high-performance lightweight aggregates prepared from ferrochromium slag. *Construction and Building Materials*, 142, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.083>