Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi e-ISSN: 2549-4236, p-ISSN: 1411-8939
Lembaga Penellitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
Vol 25, No 2 (2025): Juli, 1170-1177
DOI: 10.33087/jiubj.v25i2.6169

Evaluasi Kinerja Beton Ramah Lingkungan dengan Penambahan Superplastisizer dan *Hydrated Lime*

Rizki Amalia Tri Cahyani, Yunan Rusdianto, Ahmad Zainil Cahyadi, Parlingga Trisyulianto, Azhar Adi Darmawan
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Malang
Correspondence: rizkiatcahyani@umm.ac.id

Abstrak. Penelitian ini mengkaji performa beton ramah lingkungan dengan memanfaatkan superplastisizer dan *hydrated lime* sebagai bahan pengisi. Superplastisizer digunakan untuk mereduksi volume air dan semen dalam campuran beton secara simultan. *Hydrated lime* ditambahkan sebagai bahan pengisi untuk mengkompensasi penurunan volume pasta. Evaluasi dilakukan melalui pengujian kuat tekan, penyerapan air, dan sorptivity. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan superplastisizer secara signifikan meningkatkan workabilitas dan kuat tekan beton, meskipun kadar air dan semen dikurangi sebesar 10%. Campuran ini menunjukkan performa terbaik, ditandai dengan nilai slump dan kuat tekan tertinggi. Sebaliknya, penambahan *hydrated lime* justru menurunkan kuat tekan sebesar 2,7% dibandingkan campuran kontrol. Uji penyerapan air dan *sorptivity* menunjukkan bahwa beton dengan *hydrated lime* memiliki kapasitas penyerapan air yang rendah, namun mengalami laju penyerapan awal yang tinggi. Temuan ini mengindikasi perlunya metode pengujian yang lebih beragam atau perluasan variabel penelitian untuk mengukur kinerja ketahanan beton terhadap penetrasi air.

Kata Kunci: beton ramah lingkungan, hydrated lime, superplastisizer, kuat tekan, penyerapan air.

Abstract. *This study investigates the performance of environmentally friendly concrete by utilizing superplasticizer and hydrated lime as filler materials. The superplasticizer was used to simultaneously reduce the water and cement content in the concrete mix, while hydrated lime was added as a filler to compensate for the reduced paste volume. The evaluation was conducted through compressive strength testing, water absorption, and sorptivity measurements. The results show that the incorporation of superplasticizer significantly improved both workability and compressive strength, despite a 10% reduction in water and cement content. This mixture demonstrated the best performance, indicated by the highest slump and compressive strength values. Conversely, the addition of hydrated lime resulted in a 2.7% decrease in compressive strength compared to the control mix. Water absorption and sorptivity tests revealed that concrete containing hydrated lime had lower total water absorption capacity but exhibited a higher initial rate of water absorption. These findings suggest the need for more diverse testing methods or an expanded set of research variables to obtain a more comprehensive assessment of concrete's resistance to water penetration.*

Keywords: *green concrete, hydrated lime, superplastisizer, compressive strength, water absorption.*

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling umum digunakan secara global, didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan pembangunan infrastruktur dan pengembangan perkotaan (Miller et al., 2018). Akibatnya, kebutuhan semen Portland sebagai pengikat utama material beton meningkat tajam. Pada tahun 2019, produksi semen global mencapai 4,1 miliar ton, dan diproyeksikan meningkat menjadi 4,83 miliar ton per tahun di tahun 2030 (Diniz et al., 2022). Meskipun berperan penting dalam konstruksi modern, produksi semen menyebabkan masalah lingkungan yang serius akibat tingginya jejak karbon yang ditimbulkan (Anjos et al., 2020; Valcuende et al., 2020).

Produksi semen menjadi sumber sekitar 8% emisi gas karbondioksida secara global, dan sebagian besar disebabkan oleh proses kalsinasi batu kapur untuk menghasilkan klinker. Dampak lingkungan yang ditimbulkan meliputi emisi gas rumah kaca, perubahan iklim, dan risiko terhadap kesehatan manusia, mendesak adanya solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (Etim et al., 2021; Mohamad et al., 2022). Salah satu strategi yang berkembang adalah dengan mengurangi penggunaan semen Portland dan menggantikannya dengan material pozzolan seperti fly ash, silica fume, dan slag baja (Dipta et al., 2023; Mohsen et al., 2023). Namun, beton ramah lingkungan dapat diproduksi dengan mengurangi penggunaan semen dan air secara simultan melalui pemanfaatan *high-range water-*

reducing admixture, seperti superplastisizer (Proske et al., 2017).

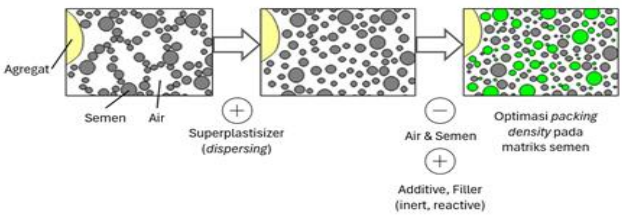
Prosedur ini dapat digunakan untuk mengembangkan beton struktural dengan kekuatan tekan normal namun memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah. Konsep dasar yang digunakan adalah reduksi kebutuhan air dalam campuran beton menggunakan *admixture* superplastisizer. Penambahan superplastisizer terbukti dapat mengurangi kebutuhan air secara signifikan dan sekaligus meningkatkan kuat tekan beton (Alsadey & Omran, 2022; Ardiansyah et al., 2024). Berdasar kepada tingkat reduksi air dan kenaikan kuat tekan beton, kebutuhan semen dapat diminimalkan. Kemudian, volume air dan semen yang tereduksi dapat digantikan dengan *additives* atau *filler* mineral, seperti *limestone.* Dengan demikian, kepadatan beton dapat lebih dioptimalkan.

Hydrated lime atau kalsium hidroksida [$Ca(OH)_2$] adalah senyawa anorganik berbentuk bubuk putih yang diperoleh melalui proses hidrasi kalsium oksida (*quicklime*). *Quicklime* terbentuk saat batu kapur (*limestone,* $CaCO_3$) mengalami proses kalsinasi pada suhu tinggi (Chen et al., 2023). *Hydrated lime* menambah ketersediaan *portlandite* dalam beton, sehingga bahan ini banyak digunakan untuk mempercepat hidrasi *fly ash* (Anjos et al., 2020; Valcuende et al., 2020). Studi lain menyoroti penggunaan *hydrated lime* sebagai bahan pengganti sebagian semen dan *filler* untuk meningkatkan kuat tekan dan durabilitas beton (Awodiji et al., 2018; Kosim & Fikri, 2023; Sarsam et al., 2013; Temitope & Awodiji, 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa beton ramah lingkungan melalui reduksi kadar air dan semen dan pemanfaatan *hydrated lime* sebagai bahan tambah. *Hydrated lime* digunakan untuk menggantikan penurunan volume semen dan meningkatkan kepadatan beton. Evaluasi dilakukan melalui pengujian kuat tekan, penyerapan air, dan *sorptivity*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan beton ramah lingkungan.

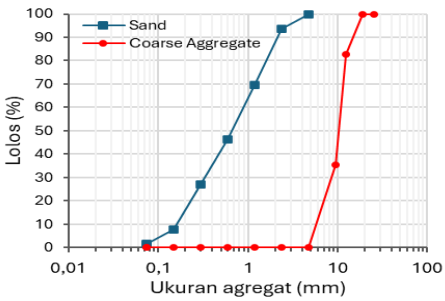
METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan beton struktural dengan dampak lingkungan yang lebih rendah melalui dua strategi utama: (1) mengurangi volume air dan semen dalam campuran beton dengan bantuan superplastisizer; dan (2) menambahkan *hydrated lime* sebagai bahan pengisi (*filler*) untuk mengkompensasi penurunan volume pasta dan meningkatkan kepadatan matriks beton.



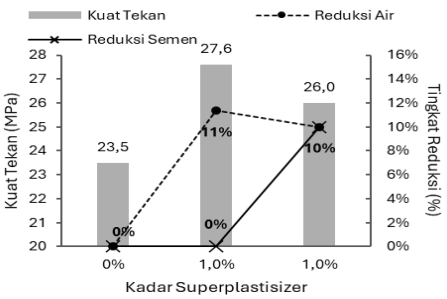
Sumber: Proske et al. (2017)

Gambar 1
Skema pengembangan beton ramah lingkungan melalui penggunaan superplastisizer dan bahan pengisi (*filler*)



Sumber data: data diolah

Gambar 2.
Distribusi ukuran agregat dari pasir dan agregat kasar



Sumber data: data diolah

Gambar 3.
Kuat tekan campuran beton dengan reduksi air dan semen

Bahan Penyusun Beton

Beton dibuat menggunakan Portland Composite Cement (PCC) sesuai SNI 7064:2014, *hydrated lime*, pasir, agregat kasar, air, dan *admixture* superplastisizer. PCC dipilih karena menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibanding semen Portland biasa (Karadumpa & Pancharathi, 2023). Pasir dan batu pecah masing-masing berukuran maksimum 4 mm dan 16 mm, dan telah memenuhi standar gradasi agregat menurut ASTM C-33M. *Admixture* superplastisizer berbasis naphthalene (Sikament LN) digunakan untuk mengurangi kebutuhan air dalam campuran beton.

Campuran Beton dengan Reduksi Air dan Semen

Berdasarkan penelitian Ardiansyah et al. (2024), Sikament LN pada dosis 1,0% dari berat semen dapat mereduksi kebutuhan air hingga 11,3%, dengan peningkatan kuat tekan mencapai 10,6% dibandingkan beton referensi. Dengan demikian, kadar semen dalam campuran beton dapat diturunkan untuk mendapat kuat tekan yang setara dengan beton referensi. Campuran beton direncanakan mengacu pada temuan tersebut. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan 1% Sikament LN dapat mereduksi kebutuhan semen hingga 10% dengan tetap mempertahankan kuat tekan beton rencana. Superplastisizer digunakan untuk menurunkan kebutuhan air, sehingga rasio air semen (*water to cement,* w/c, *ratio*) ikut berkurang. Kemudian, kadar semen diturunkan hingga diperoleh kembali rasio w/c yang sama seperti kondisi awal. Volume pasta semen yang berkurang digantikan oleh penyesuaian proporsi agregat (pasir dan batu pecah) untuk menjaga total volume campuran. Konsistensi campuran beton dijaga agar setara dengan campuran beton konvensional. Hasil kuat tekan campuran beton dengan reduksi air dan semen serta rasio w/c sebesar 0,52.

Campuran Beton dengan Hydrated Lime

Dalam penelitian ini, superplastisizer digunakan untuk mengurangi volume air dan semen dalam campuran beton. Seluruh campuran beton dirancang dengan rasio air semen (w/c) tetap sebesar 0,5. Konsistensi campuran dijaga agar tetap setara dengan campuran beton konvensional. Superplastisizer dengan kadar 1% terhadap berat semen, digunakan untuk mereduksi kebutuhan air dan semen masing-masing sebesar 10%. Volume pasta yang hilang akibat pengurangan semen dikompensasi dengan penambahan *hydrated lime*.

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada spesimen silinder berukuran 150 x 300 mm sesuai standar ASTM C-39M. Sebelum pengujian, spesimen direndam dalam air (*curing*) selama 7 dan 28 hari. Nilai kuat tekan diperoleh dari rata-rata hasil pengujian tiga spesimen untuk setiap variasi campuran.

Tabel 1
Proporsi campuran beton

Mix Design	Berat tiap m^3 beton	CN	CSP	CSP-HL
Semen	kg	432,0	388,8	388,8
Hydrated lime	kg	0	0	43,2
Air	kg	216,0	194,4	194,4
Superplastisizer	kg	0	4,3	4,3
Pasir	kg	857,0	889,4	878,6
Batu pecah	kg	805,0	837,4	805,0
w/c	[-]	0,5	0,5	0,5
Reduksi semen	kg	0	43,2	43,2
Reduksi air	kg	0	21,6	21,6

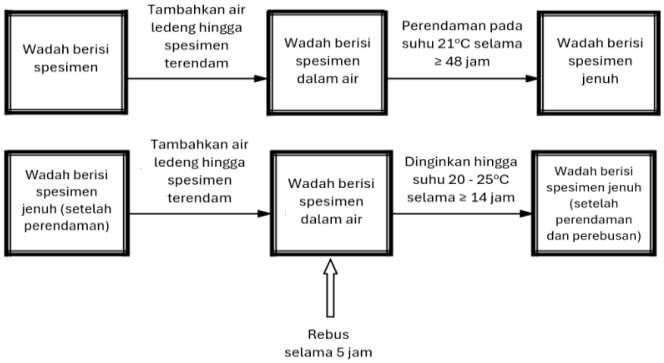
Sumber: data diolah

Pengujian Penyerapan Air (Water Absorption) Beton

Tingkat penyerapan air merupakan parameter penting dalam mengukur durabilitas beton (Kewalramani & Khartabil, 2021; Mhaya et al., 2022). Pengujian penyerapan air dilakukan mengacu pada ASTM C642 menggunakan spesimen beton berbentuk kubus berukuran 100 x 100 x 100 mm. Pengujian ini mengukur penyerapan air beton dalam bentuk persentase

dari volume pori yang tembus air (*volume of permeable voids*) (Kewalramani & Khartabil, 2021). Spesimen dikeringkan dalam oven bersuhu 110°C selama 24 jam, kemudian direndam di dalam air selama 48 jam. Kemudian, spesimen direbus dalam air selama 5 jam, lalu didinginkan selama 14 jam hingga mencapai suhu ruang. Spesimen ditimbang dan diukur massanya pada tiap langkah tersebut. Volume *permeable voids* ditentukan berdasarkan selisih dari massa jenuh setelah perebusan (M_3) dan massa kering oven (M_1) dibagi dengan selisih dari massa jenuh spesimen setelah direbus dan massa semu (*apparent mass*) spesimen tersebut di dalam air (M_2). Nilai ini diekspresikan dalam persentase seperti ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut:

Volume permeable (%) = $\left[\frac{M_3-M_1}{M_3-M_2}\right] x100$



Sumber: Huang et al. (2024)

Gambar 4
Skema pengujian penyerapan air sesuai ASTM C642

Pengujian Capillary Water Absorption (Sorptivity)

Laju penyerapan air pada beton melalui aksi kapiler atau *sorptivity* diukur berdasarkan standar ASTM C1585. Nilai *sorptivity* dapat digunakan sebagai salah satu indeks durabilitas untuk mengestimasi seberapa cepat air dapat meresap dalam beton (Girish et al., 2021). Spesimen beton berbentuk kubus berukuran 100 x 100 x 100 mm yang telah melalui *curing* selama 28 hari, dikeringkan dalam oven bersuhu 105°C selama 48 jam dan didinginkan hingga mencapai suhu ruang. Kemudian, spesimen dilapisi dengan *epoxy resin* di keempat sisi sampingnya. Permukaan atas spesimen ditutup dengan plastik film untuk memastikan hanya permukaan bawah spesimen yang kontak dengan air. Spesimen diletakkan pada suatu tumpuan sehingga tinggi air dapat dijaga 1 – 3 mm dari bagian dasar spesimen.

Selama pengujian, spesimen ditimbang dan diukur sesuai interval waktu dalam ASTM C1585. Laju penyerapan awal (*initial rate of absorption*) ditentukan dari awal penyerapan hingga 6 jam. Massa spesimen diukur setiap 1, 5, 10, 20, 30, dan 60 menit, lalu dilanjutkan di tiap jam hingga mencapai 6 jam. Laju penyerapan sekunder (*secondary rate of absorption*) ditentukan dalam interval waktu 1 hingga 7 hari, dengan pengukuran massa spesimen dilakukan tiap 24 jam. Dari data perubahan massa spesimen beton dalam waktu tertentu, penyerapan air kumulatif I (mm) terhadap luas permukaan potongan bidang (*cross-sectional area*) dapat diperoleh menggunakan persamaan sebagai berikut:

$I = \frac{m_t}{A\rho}$

keterangan m_t adalah perubahan massa spesimen sebelum dan sesudah penyerapan (g); A adalah luas area kontak spesimen dengan air (mm^2); dan ρ adalah massa jenis air (g/mm^3).

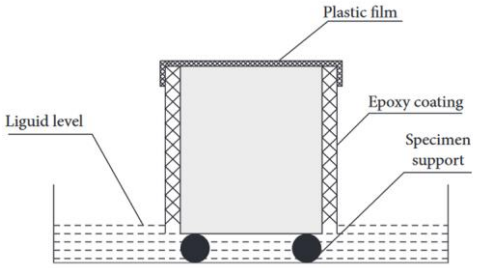
Data yang telah dianalisa kemudian diplot dalam grafik, dengan sumbu vertikal menyatakan penyerapan air kumulatif I (mm), dan sumbu horizontal menyatakan akar dari waktu dalam detik ($sec^{1/2}$). Kemiringan garis linear dari grafik menunjukkan laju penyerapan air ($mm/sec^{1/2}$).

HASIL

Properti Beton Segar

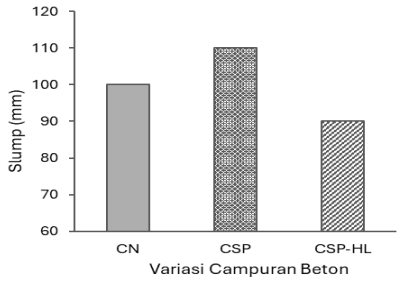
Semua campuran dirancang untuk memiliki konsistensi dengan nilai slump 90 – 110 mm, seluruh variasi campuran mencapai target slump tersebut, meskipun kadar air direduksi sebesar 10% pada campuran CSP dan CSP-HL. Campuran dengan penambahan

hydrated lime menghasilkan nilai slump paling rendah, yang mengindikasi penurunan workabilitas. Penurunan ini kemungkinan disebabkan oleh luas permukaan spesifik (*specific surface area*) hydrated lime yang tinggi, sehingga menyerap lebih banyak air. Temuan ini sejalan dengan penelitian Bakr & Singh (2024) dan Valcuende et al. (2020), yang menunjukkan peningkatan kebutuhan air pada campuran beton dengan *hydrated lime* untuk mencapai konsistensi yang setara dengan beton konvensional.



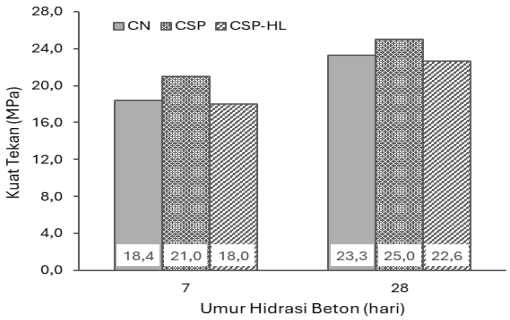
Sumber: Xiao et al. (2020)

Gambar 5.
Skema pengujian *sorptivity* sesuai ASTM C1585



Sumber: data diolah

Gambar 6.
Nilai slump pada tiap variasi campuran beton



Sumber: data diolah

Gambar 7. Nilai kuat tekan tiap variasi campuran beton pada umur perawatan 7 dan 28 hari

Sementara itu, campuran CSP dengan kadar air dan semen 10% lebih rendah dari campuran kontrol, menghasilkan workabilitas yang paling tinggi. Hasil ini menunjukkan efektivitas superplastisizer dalam mendispersi partikel semen dan membebaskan air yang terperangkap di antara permukaan partikel tersebut, sehingga mengurangi kebutuhan air untuk mencapai tingkat konsistensi yang diinginkan (Huang et al., 2024).

Kuat Tekan Beton

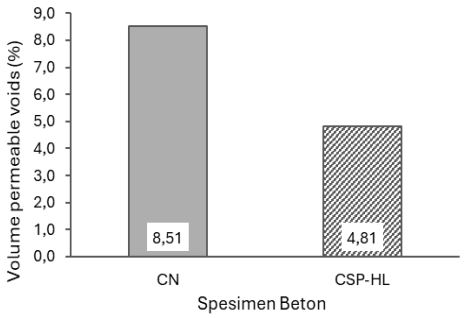
Hasil uji kuat tekan beton pada umur 7 dan 28 hari untuk ketiga variasi campuran ditunjukkan pada Gambar 7. Semua variasi menunjukkan tren peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur perawatan beton. Campuran CSP, dengan penurunan kadar air dan semen sebesar 10%, menunjukkan kuat tekan tertinggi, bahkan melampaui campuran kontrol pada kedua umur pengujian. Hasil ini menunjukkan pengaruh yang signifikan dari penambahan superplastisizer terhadap kuat tekan beton. Pengurangan kadar air dan semen secara simultan, dengan mempertahankan rasio w/c konstan, memungkinkan diperolehnya kuat tekan beton yang setara atau lebih tinggi dari kuat tekan beton tanpa penambahan *admixture* (CECEL et al., 2019).

Sementara itu, spesimen CSP-HL dengan penambahan *hydrated lime* mengalami penurunan kuat tekan sebesar 2,7% dibandingkan spesimen kontrol. Hasil serupa diperoleh Sarsam et al. (2013), yang menunjukkan adanya kecenderungan penurunan kuat tekan beton seiring meningkatnya substitusi semen dengan *hydrated lime*. Berdasarkan Sarsam et al. (2013), penurunan ini dapat dikaitkan dengan sifat fisik *hydrated lime* yang memiliki *specific gravity* lebih rendah (sekitar 2,3) dibandingkan semen Portland (sekitar 3,15). Artinya, untuk massa yang sama, *hydrated lime* menghasilkan volume yang lebih besar daripada semen (Mohammadifar et al., 2022). Akibatnya, meskipun volume pasta meningkat, jumlah material hidrolis yang berperan dalam

pembentukan gel *calcium-silicate-hydrate* (C-S-H) berkurang, sehingga berdampak negatif terhadap perkembangan kuat tekan beton.

Penyerapan Air Beton

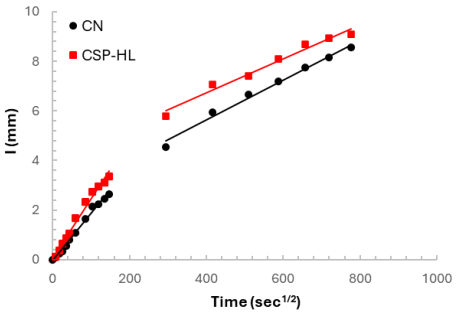
Kapasitas penyerapan air campuran CN dan CSP-HL disajikan dalam bentuk persentase volume *permeable voids*, seperti ditampilkan pada Gambar 8. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran CSP-HL dengan penambahan *hydrated lime* memiliki volume *permeable voids* yang lebih rendah sebesar 43% dibandingkan dengan spesimen kontrol, mengindikasi penurunan kapasitas penyerapan air. Hasil ini dapat disebabkan oleh *specific gravity hydrated lime* yang lebih rendah dibandingkan semen, sehingga untuk massa yang sama, volume *hydrated lime* dalam campuran lebih besar. Akibatnya, terjadi penurunan nilai persentase volume pori yang tembus air. Namun, kondisi kejenuhan spesimen yang tidak sempurna (*incomplete saturation*) dapat menyebabkan estimasi nilai porositas yang lebih rendah dari nilai aktualnya (Kewalramani & Khartabil, 2021; Moore et al., 2020). Oleh karenanya, interpretasi hasil ini perlu dikaji lebih lanjut dengan dukungan metode pengujian tambahan (seperti *vacuum saturation*) atau dengan memperluas variabel penelitian.



Sumber: data olahan

Gambar 8

Persentase volume *permeable voids* pada spesimen CN dan CSP-HL



Sumber: data diolah

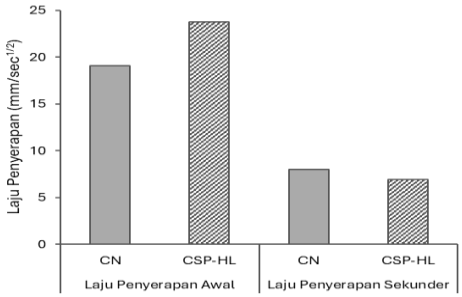
Gambar 9.

Hubungan antara penyerapan air terhadap waktu pada spesimen CN dan CSP-HL

Capillary Water Absorption

Gambar 9 menunjukkan hubungan penyerapan air (*absorption*) terhadap waktu. Terlihat adanya dua tren penyerapan air yang berbeda, yang menggambarkan perubahan laju penyerapan air. Pada tahap awal, penyerapan berlangsung dengan laju yang tinggi, ditunjukkan oleh kemiringan garis grafik yang curam. Setelah sekitar 294 $sec^{1/2}$ (hari pertama), grafik menunjukkan perubahan kemiringan menjadi lebih landai, menandakan laju penyerapan yang menurun seiring waktu. Penurunan ini disebabkan oleh bertambahnya kejenuhan pada permukaan beton yang kontak dengan air, yang menyebabkan menurunnya laju penyerapan (Xiao et al., 2020).

Kemiringan garis dari grafik penyerapan air I (mm) terhadap akar dari waktu ($sec^{1/2}$) menunjukkan laju penyerapan awal (6 jam pertama) dan laju penyerapan sekunder (hari ke-1 hingga hari ke-7). Dari Gambar 10, dapat terlihat bahwa spesimen CSP-HL mengalami laju penyerapan awal yang lebih tinggi dibandingkan spesimen kontrol. Sementara itu, laju penyerapan sekunder kedua spesimen relatif setara. Hasil ini bertolak belakang dengan hasil uji penyerapan air sesuai ASTM C642, yang menunjukkan kapasitas penyerapan air CSP-HL yang lebih rendah. Penyerapan air akibat aksi kapiler, atau *sorptivity*, lebih dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori dibandingkan dengan porositas total (Ye et al., 2017). Beton dengan pori-pori yang kecil dan saling terhubung dapat menunjukkan nilai *sorptivity* yang lebih tinggi meskipun memiliki porositas total yang rendah, karena aksi kapiler bekerja lebih efektif pada pori berukuran kecil. Penemuan ini turut mendukung dugaan bahwa estimasi nilai penyerapan air yang didapat dari metode uji ASTM C642 lebih rendah dari nilai yang seharusnya.



Sumber: data olahan

Gambar 10
Nilai laju penyerapan awal dan laju penyerapan sekunder pada spesimen CN dan CSP-HL

SIMPULAN

Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan *admixture* superplastisizer secara signifikan meningkatkan workabilitas dan kuat tekan beton, meskipun kadar air dan semen direduksi sebesar 10%. Campuran ini menghasilkan performa terbaik, ditunjukkan oleh nilai slump dan kuat tekan tertinggi. Sebaliknya, penambahan *hydrated lime* sebagai bahan pengisi untuk mengompensasi penurunan volume pasta akibat pengurangan air dan semen justru menurunkan kuat tekan beton sebesar 2,7% dibandingkan campuran kontrol. Penurunan ini kemungkinan akibat *specific gravity* hydrated lime yang lebih rendah dan kontribusinya yang terbatas dalam pembentukan gel C-S-H. Selain itu, hasil uji penyerapan air berdasarkan ASTM C642 menunjukkan bahwa beton dengan *hydrated lime* memiliki nilai penyerapan air yang lebih rendah, meskipun mengalami laju penyerapan awal yang lebih tinggi dalam uji *sorptivity*. Temuan ini mengindikasikan perlunya penggunaan metode pengujian yang lebih beragam atau penambahan variabel penelitian untuk dapat mengukur performa durabilitas beton terhadap penetrasi air.

DAFTAR PUSTAKA

Abu Bakr, M., & Singh, B. K. 2024. Strength and durability properties of recycled aggregate concrete blended with hydrated lime and brick powder. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *28*(6), 1259–1283.

Alsadey, S., & Omran, A. 2022. Effect of Superplasticizers to Enhance the Properties of Concrete. *Design, Construction, Maintenance*, *2*, 84–91.

Anjos, M. A. S., Camões, A., Campos, P., Azeredo, G. A., & Ferreira, R. L. S. 2020. Effect of high volume fly ash and metakaolin with and without hydrated lime on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, *27*(October 2019).

Ardiansyah, P. P., Cahyani, R. A. T., & Rusdianto, Y. 2024. Optimalisasi Penggunaan Superplastisizer dan Reduksi Air untuk Peningkatan Kinerja Beton. *Jurnal Media Teknik Sipil*, *22*(1), 31–38.

Awodiji, C. T. G., Onwuka, D. O., Okere, C., & Ibearugbulem, O. 2018. Anticipating the Compressive Strength of Hydrated Lime Cement Concrete Using Artificial Neural Network Model. *Civil Engineering Journal*, *4*(12), 3005.

Cecel, R. T., Abrão, P. C. R. A., Cardoso, F. A., & John, V. M. 2019. Consumption of superplasticizer admixture for different cements and their binder efficiency. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, *12*(6), 1260–1287.

Chen, Y., Li, S., Lin, S., Chen, M., Tang, C., & Liu, X. 2023. Promising energy-storage applications by flotation of graphite ores: A review. *Chemical Engineering Journal*, *454*, 139994.

Diniz, H. A. A., dos Anjos, M. A. S., Rocha, A. K. A., & Ferreira, R. L. S. 2022. Effects of the use of agricultural ashes, metakaolin and hydrated-lime on the behavior of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, *319*, 126087.

Dipta, O. B., Sobhan, S. K. F., & Shuvo, A. K. 2023. Assessment of the Combined Effect of Silica Fume, Fly Ash, and Steel Slag on the Mechanical Behavior of Concrete. *Journal of Civil Engineering and Construction*, *12*(2), 78–85.

Etim, M.-A., Babaremu, K., Lazarus, J., & Omole, D. 2021. Health Risk and Environmental Assessment of Cement Production in Nigeria. *Atmosphere*, *12*(9), 1111.

Girish, S., Ajay, N., & Soumya, T. 2021. *Sorptivity as a Durability Index for Service Life Prediction of Self-compacting Concrete*. 295–309.

Huang, H., Amin, M. N., Khan, S. A., Khan, K., & Qadir, M. T. 2024. Efficacy of sustainable cementitious materials on concrete porosity for enhancing the durability of building materials. *Reviews On Advanced Materials Science*, *63*(1).

Huang, R., Xu, L., Xu, Z., Zhang, Q., & Wang, J. 2024. A Review on Concrete Superplasticizers and Their Potential Applications for Enhancing the Performance of Thermally Activated Recycled Cement. *Materials*, *17*(17), 4170.

Karadumpa, C. S., & Pancharathi, R. K. 2023. Study on energy use and carbon emission from manufacturing of OPC and blended cements in India. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(4), 5364–5383.

Kewalramani, M., & Khartabil, A. 2021. Porosity Evaluation of Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials for Durability Assessment through Volume of Permeable Voids and Water Immersion Conditions. *Buildings*, *11*(9), 378.

Kosim, K., & Fikri, J. 2023. Superplasticizer and hydrated lime for high-strength concrete. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, *19*(01), 62–69.

Mhaya, A. M., Algaifi, H. A., Shahidan, S., Zuki, S. S. M., Azmi, M. A. M., Ibrahim, M. H. W., & Huseien, G. F. 2022. Systematic Evaluation of Permeability of Concrete Incorporating Coconut Shell as Replacement of Fine Aggregate. *Materials*, *15*(22), 7944.

Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. 2018. Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, *114*, 115–124.

Mohamad, N., Muthusamy, K., Embong, R., Kusbiantoro, A., & Hashim, M. H. 2022. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. *Materials Today: Proceedings*, *48*, 741–746.

Mohammadifar, L., Miraki, H., Rahmani, A., Jahandari, S., Mehdizadeh, B., Rasekh, H., Samadi, P., & Samali, B. 2022. Properties of Lime-Cement Concrete Containing Various Amounts of Waste Tire Powder under Different Ground Moisture Conditions. *Polymers*, *14*(3), 482.

Mohsen, M. O., Aburumman, M. O., Al Diseet, M. M. Al, Taha, R., Abdel-Jaber, M., Senouci, A., & Taqa, A. A. 2023. Fly Ash and Natural Pozzolana Impacts on Sustainable Concrete Permeability and Mechanical Properties. *Buildings*, *13*(8), 1927.

Moore, A. J., Bakera, A. T., & Alexander, M. G. 2020. Water sorptivity and porosity testing of concrete. *Concrete Beton*, *162*(June), 13–16.

Proske, T., Hainer, S., Rezvani, M., & Graubner, C.-A. 2017. Eco-Friendly Concretes With Reduced Water and Cement Content. In *Handbook of Low Carbon Concrete*, 63–87. Elsevier.

Sarsam, S. I., Salih, A. A., & Abdullah, S. G. 2013. Effect of Hydrated Lime on the Properties of Roller Compacted Concrete. *Journal of Engineering*, *19*(3), 377–387.

Temitope, C., & Awodiji, G. 2023. Performance of Hydrated Lime on the Durability of Portland Cement Concrete. *Uniport Journal OfEngineering and ScientificResearch (UJESR)*, *8*(1), 92–99.

Valcuende, M., Calabuig, R., Martínez-Ibernón, A., & Soto, J. 2020. Influence of hydrated lime on the chloride-induced reinforcement corrosion in eco-efficient concretes made with high-volume fly ash. *Materials*, *13*(22), 1–16.

Xiao, Q., Liu, X., Qiu, J., & Li, Y. 2020. Capillary Water Absorption Characteristics of Recycled Concrete in Freeze-Thaw Environment. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2020*.

Ye, H., Jin, N., Jin, X., & Fu, C. 2017. An Experimental Study on Relationship among Water Sorptivity, Pore Characteristics, and Salt Concentration in Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.