Kinerja Durabilitas Mortar Ramah Lingkungan Berbasis Limbah *Ultrafine* Ampas Teh

Ali Fauzi Mahmuda*[1], Nur Okviyani[2], Apriansyah[3]

[1,2,3]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat, Majene
e-mail: *1alifauzimahmuda99@gmail.com, 2 nur.okviyani@unsulbar.ac.id, 3 Apriansyah@unsulbar.ac.id

Received 11th October2025; Reviewed 25 th November 2025; Accepted 27 th November 2025
Journal Homepage: http://jurnal.ubt.ac.id/index.php/bejts
Doi : https://doi.org/10.35334/be.v9i3.454

Abstract

This study evaluates the effect of substituting ultrafine tea-waste particles for cement on mortar durability as a pathway to reducing the cement footprint. Four mixes were prepared (0, 5, 7.5, and 10% by cement mass). Durability was assessed via water absorption at 28 and 91 days, half-cell potential at 7, 28, and 91 days, and chloride penetration depth at 28 days. At 91 days, water absorption was: control 11.22%; 5% 11.03%; 7.5% 16.16%; 10% 17.14%, indicating that 5% provides the most favorable transport behavior among tea-waste mixes. HCP values at 91 days shifted toward more positive potentials: control −12.5 mV (low corrosion probability), 7.5% −52.7 mV and 10% −64.1 mV (both low), while 5% remained around −117.9 mV (moderate). Chloride penetration at 28 days followed: control 39.349 mm; 5% 41.941 mm; 7.5% 45.840 mm; 10% 47.064 mm. The results reveal composition-specific optima: 5% is most effective for limiting water/ion transport, whereas electrochemical indicators are more favorable at 7.5–10%. Practically, a 5–7.5% substitution window can be selected according to design priorities (chloride ingress control vs. lowering corrosion probability), provided water–binder ratio and curing are well controlled. Overall, ultrafine tea-waste particles are a promising waste-derived additive for durable mortar.

Keywords: *mortar durability; ultrafine tea waste; water absorption; half-cell potential; chloride penetration*

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh substitusi ultrafine ampas teh terhadap durabilitas mortar sebagai upaya reduksi jejak semen. Empat campuran disiapkan (0; 5; 7,5; 10% terhadap massa semen). Evaluasi dilakukan melalui uji daya serap air pada umur 28 dan 91 hari, half-cell potential pada 7, 28, dan 91 hari, serta kedalaman penetrasi ion pada 28 hari. Pada 91 hari, daya serap menunjukkan: kontrol 11,22%; 5% 11,03%; 7,5% 16,16%; 10% 17,14. Nilai HCP 91 hari menunjukkan pergeseran lebih positif: kontrol −12,5 mV (risiko rendah), 7,5% −52,7 mV dan 10% −64,1 mV (keduanya risiko rendah), sedangkan 5%≈ −117,9 mV (sedang). Pada 28 hari, kedalaman penetrasi klorida berturut-turut: kontrol 39,349 mm; 5% 41,941 mm; 7,5% 45,840 mm; 10% 47,064 mm. Temuan ini mengindikasikan adanya batas optimum: 5% memberikan kinerja transport terbaik di antara campuran ampas teh (serapan dan klorida lebih rendah), sedangkan indikator elektrokimia lebih menguntungkan pada 7,5–10%. Secara praktis, rentang 5–7,5% dapat dipilih sesuai prioritas desain (pengendalian ingress klorida vs. penurunan peluang korosi), dengan pengendalian w/b dan

curing yang memadai. Hasil mendukung kelayakan ampas teh ultrahalus sebagai material tambah berbasis limbah untuk mortar berketahanan tinggi.

Kata kunci: *mortar; ampas teh; daya serap air; half-cell potential; penetrasi klorida*

1. Pendahuluan

Durabilitas mortar merupakan aspek kunci yang menentukan keandalan serta umur layan suatu struktur bangunan. Sebagai perekat pada pasangan bata, plester, dan acian, ketahanan mortar terhadap pengaruh lingkungan sangat memengaruhi kualitas keseluruhan konstruksi, sebagaimana ditunjukkan oleh temuan Zuraidah dan Hastono (2018). Permasalahan utama pada mortar dan beton adalah tingginya konsumsi semen yang berdampak pada emisi CO_2; karena itu dibutuhkan inovasi material yang lebih ramah lingkungan tanpa menurunkan kinerja mekanik maupun durabilitas, sebagaimana dibahas oleh Patah dkk (2022) dan Nur (2024). Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah pemanfaatan bahan pozolanik alami maupun hasil pembakaran limbah pertanian seperti palm oil fuel ash (POFA), fly ash, dan abu biomassa. Penerapan POFA halus hingga ultrafine dilaporkan mampu meningkatkan kekedapan dan menurunkan porositas pada sistem semen (Nasr dkk, 2019; Jakhrani dkk, 2025). Selain itu, penggunaan partikel berukuran nano pada rancangan paving block berbasis lingkungan maritim juga menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap penetrasi ion klorida (Wulandari dkk, 2023). Kecenderungan pemadatan mikrostruktur ini sejalan dengan kepatuhan terhadap persyaratan material dalam standar nasional, yang menjadi acuan mutu bahan dan praktik baik di lapangan.

Beberapa kajian lain menegaskan bahwa pengaturan mutu komponen campuran, termasuk kualitas air pencampur, berkontribusi pada penurunan permeabilitas dan peningkatan kuat tekan, selaras dengan rujukan tata cara dan spesifikasi yang berlaku (Badan Standardisasi Nasional, 2004). Prinsip perancangan campuran yang tepat juga krusial untuk mencapai kadar substitusi optimum dalam berbagai sistem matriks semen (Badan Standardisasi Nasional, 2000). Di sisi lain, pengaruh penggunaan fly ash dan agregat berbasis lingkungan laut terhadap porositas serta ketahanan terhadap penetrasi klorida perlu dipahami bersama karakterisasi fisik yang memadai menurut standar pengujian material (Karo Karo, 2020) Selain POFA dan abu terbang, limbah biomassa juga potensial sebagai pengganti komponen beton/ mortar. Studi kinerja beton dengan material berbasis biomassa memperlihatkan peluang penurunan berat jenis tanpa mengorbankan ketahanan terhadap lingkungan agresif (Patah dan Dasar, 2022). Evaluasi ketahanan korosi pada sistem tersebut pun merujuk pada protokol pengujian elektrokimia yang terdokumentasi, dan praktik terkini menegaskan pemanfaatan pemetaan HCP serta teknik elektrokimia terkait untuk menilai probabilitas korosi (Almashakbeh dkk., 2022; Rodulfo dkk., 2023; Adriman dkk., 2022). Sementara itu, indikator transport ionik dan porositas efektif umumnya dikaji melalui prosedur difusi klorida berbasis bulk diffusion dan pengukuran penyerapan air yang terstandardisasi (Xu dan Ye, 2023; Zhuang dkk., 2022).

Di tengah lanskap tersebut, pemanfaatan limbah ampas teh sebagai bahan tambah konstruksi masih relatif terbatas. Kandungan silika/alumina dan karbon aktif pada produk berbasis teh membuka potensi sifat pozolanik sekaligus interaksi kimia permukaan. Sejumlah temuan menunjukkan peningkatan kuat tekan mortar serta penurunan laju penetrasi klorida pada sistem yang memanfaatkan derivat limbah teh (Nasr dkk, 2019; Jakhrani dkk, 2025; Karo Karo, 2020). Bahkan, komponen teh hitam dilaporkan berperan sebagai inhibitor korosi alami pada baja karbon dalam media agresif (Wulandari dkk, 2023). Hal ini menegaskan bahwa pemanfaatan ampas teh sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular sekaligus menambah opsi material tambah berkelanjutan (Horma dkk, 2022; Ridhayani dkk, 2023).

Meskipun berbagai limbah biomassa seperti POFA, abu sekam padi, dan fly ash telah banyak diteliti sebagai material pozolanik, pemanfaatan ampas teh sebagai substitusi pengikat masih sangat terbatas, terutama dalam bentuk ultrafine tanpa proses pembakaran. Padahal, beberapa studi menunjukkan bahwa komponen silika, alumina, serta kandungan karbon aktif dalam limbah teh berpotensi

memperbaiki mikrostruktur dan bahkan memberikan efek inhibisi korosi. Namun demikian, penelitian sebelumnya umumnya hanya berfokus pada sifat mekanik atau pengujian tunggal durabilitas, sehingga belum ada kajian yang secara simultan mengevaluasi daya serap air, half-cell potential, dan penetrasi klorida. Selain itu, kadar optimum substitusi yang menyeimbangkan antara mekanisme transport dan respons elektrokimia juga belum pernah diidentifikasi.

Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan beberapa aspek kebaruan: (1) pemanfaatan ultrafine tea waste sebagai SCM dengan pendekatan reaksi pozolanik sekunder dan filler effect; (2) evaluasi durabilitas secara terpadu melalui tiga parameter utama transport dan korosi; dan (3) identifikasi rentang substitusi optimum yang dapat mendukung perancangan mortar ramah lingkungan berbasis limbah organik. Dengan demikian, penelitian ini mengisi gap pengetahuan terkait potensi limbah ampas teh pada peningkatan durabilitas mortar dan sekaligus memperkaya alternatif material berkelanjutan dalam konstruksi.

Dalam konteks tersebut, penelitian ini mengkaji pengaruh penambahan ultrafine ampas teh terhadap peningkatan durabilitas mortar berbasis semen Portland Komposit (PCC). Evaluasi difokuskan pada tiga parameter: daya serap air, half cell potential, dan penetrasi ion klorida, untuk menilai efektivitas partikel ultrafine dalam meningkatkan ketahanan mortar terhadap kondisi lingkungan pemicu korosi yang selaras dengan arah pengembangan material berkelanjutan pada konstruksi (Dasar dkk, 2025; Yusman dan Mahmuda, 2024).

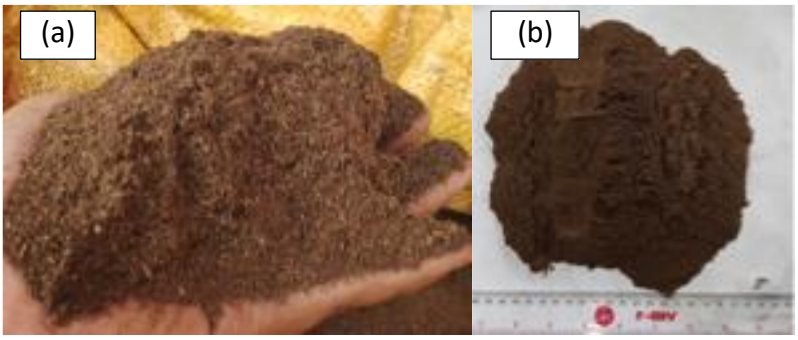
2. Metode Penelitian

2.1 Material

Material utama berupa semen Portland Komposit (PCC, merek Tonasa) sebagai pengikat, yang memenuhi persyaratan SNI 15-2049-2004. Berdasarkan pengujian laboratorium, semen ini memiliki berat jenis 3,15 berada dalam rentang acuan ASTM C188, sehingga layak digunakan sebagai bahan pengikat mortar. mpas teh yang digunakan dalam penelitian ini merupakan limbah konsumsi yang dikumpulkan dari beberapa warung minuman dan penjual es teh di wilayah Kota Majene. Limbah tersebut awalnya dicuci ringan untuk mengurangi kontaminan organik bebas, kemudian dijemur selama ±24–36 jam di bawah paparan matahari hingga mencapai kondisi kering udara (air-dry) dengan kadar air stabil. Setelah proses pengeringan, material digiling melalui dua tahap penghalusan (double grinding) menggunakan disc mill grinder berkecepatan tinggi untuk menghasilkan partikel berukuran ultrahalus dengan berat jenis 2.789. Proses ini bertujuan memecah gumpalan serat dan meningkatkan homogenitas ukuran partikel sehingga lebih efektif berperan sebagai material pengisi (micro-filler) maupun kandidat material pozolanik sekunder. Untuk memperjelas konteks material yang digunakan, Gambar 1–2 menyajikan contoh visual material penelitian (semen PCC serta ampas teh sebelum dan sesudah proses penggilingan).



Gambar 1. Semen PCC



Gambar 2. (a) Ampas teh sebelum penggilingan; (b) ampas teh setelah penggilingan dua kali

Agregat halus berasal dari Sungai Mapilli, Kabupaten Polewali Mandar. Hasil pengujian menunjukkan modulus halus butir (MHB) = 3,27, masih berada dalam batas yang dipersyaratkan SNI 03-2834-2000 untuk agregat halus (Badan Standardisasi Nasional, 2000), serta kadar lumpur ≤ 5% sesuai SNI 03-2816-1992 (Badan Standardisasi Nasional, 1992). Air pencampur menggunakan air bersih yang memenuhi SNI 03-7064-2004 bebas minyak, asam, garam, maupun zat organik pengganggu hidrasi.

2.2 Desain dan Persiapan Spesimen

Perancangan komposisi mortar pada penelitian ini mengacu pada metode rancangan campuran JIS R 5201, yang merupakan metode umum untuk mortar berbasis semen dengan proporsi terkontrol. Penentuan jumlah air pencampur menggunakan nilai faktor air-semen (FAS) sebesar 0,40, yang dipilih untuk memastikan kepadatan matriks dan konsistensi antarvariasi campuran. Empat variasi binder disiapkan, yaitu 0% (kontrol), 5%, 7,5%, dan 10% substitusi ultrafine ampas teh (UAT) terhadap berat semen. Komposisi campuran untuk masing-masing variasi ditampilkan pada Tabel 1.

Untuk pengujian daya serap air, digunakan benda uji kubus berukuran 5 × 5 × 5 cm sebanyak enam sampel untuk setiap variasi campuran. Tiga sampel diuji pada umur 28 hari, dan tiga sampel lainnya pada umur 91 hari, mengikuti ketentuan pengujian absorpsi pada material berbasis semen.

Untuk pengujian half-cell potential (HCP), digunakan benda uji silinder berukuran 5 × 10 cm dengan satu batang tulangan baja berdiameter Ø10 mm tertanam secara sentral (centered reinforcement). Penempatan tulangan dirancang dengan jarak selimut (cover) 3 cm dari serat tepi bawah, sedangkan bagian tulangan yang muncul dari permukaan atas spesimen sepanjang 3 cm disiapkan sebagai titik koneksi elektroda referensi. Setiap variasi campuran menggunakan tiga sampel sesuai metode pengukuran potensial korosi baja tulangan dalam beton.

Untuk pengujian kedalaman penetrasi ion klorida, digunakan benda uji silinder berukuran 10 × 5 cm sebanyak tiga sampel pada tiap variasi campuran. Setelah curing standar, spesimen direndam dalam larutan natrium klorida (NaCl) untuk proses difusi klorida selama 28 hari, sebelum dilakukan pemotongan melintang dan penyemprotan larutan $AgNO_3$ guna mengamati pergerakan front klorida. Metode ini mengikuti prosedur difusi curah yang digunakan pada evaluasi permeabilitas ion pada material semen..

Tabel 1. Komposisi campuran

Tipe	Air tawar (kg/m^3)	Semen (kg/m^3)	UAT (kg/m^3)			Pasir (kg/m^3)
			5%	7.5%	10%	
UAT-0 (Kontrol)	232	580				1223
UAT-5	232	551	29			1216
UAT-7.5	232	536		43		1213
UAT-10	232	522			58	1209

2.3 Metode Pengujian

2.3.1 Daya Serap

Uji daya serap mortar bertujuan menentukan persentase air yang diserap melalui jaringan pori. Semakin rendah nilai daya serap, semakin rapat mikrostruktur mortar dan semakin baik ketahanannya terhadap penetrasi ion/agen agresif. Sesuai ASTM C642-13, nilai daya serap dihitung dari perbandingan massa kering-oven dan massa jenuh-kering-permukaan (SSD) menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Daya Serap} = \frac{C-A}{A} \text{x}100\% \qquad (1)$$

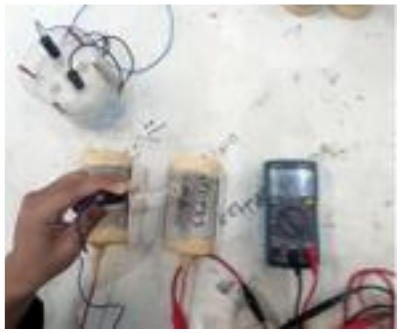
dengan:

C = massa benda uji pada kondisi SSD,

A = massa benda uji pada kondisi kering-oven.

2.3.2 Half-Cell Potential (HCP)

Metode HCP merupakan pengujian nondestruktif untuk menilai kemungkinan terjadinya korosi pada tulangan yang tertanam dalam mortar/beton menggunakan elektroda referensi Ag/AgCl. Pengukuran dilakukan berkala setiap 7 hari selama perawatan hingga umur 91 hari. Untuk tiap spesimen, diambil tiga kali pembacaan menggunakan multimeter yang dihubungkan ke referensi elektroda dan titik ukur pada permukaan spesimen; nilai HCP yang dilaporkan adalah rata-rata dari tiga pembacaan. **Gambar 3** memperlihatkan skema/konfigurasi uji HCP. Kriteria interpretasi probabilitas korosi mengikuti ASTM C876-22b dan dirangkum pada Tabel 2. Sebagai pembanding konteks aplikasi korosi pada lingkungan agresif yang terkait material berbasis teh, dapat dilihat pula temuan Wulandari dkk (2023).



Gambar 3. Skema pengujian HCP dengan elektroda Ag/AgCl.

Tabel 2. Interpretasi nilai HCP menurut ASTM C876-22b

Nilai Potensial (mV)		Interpretasi (Kemungkinan Terjadinya Korosi)
$Cu/CuSO_4$	**Ag/AgCl**	
> -200	> -106	10% kemungkinan terjadi korosi (kemungkinan sangat kecil)
−200 sampai −350	−106 sampai −256	50% kemungkinan terjadinya korosi (kategori sedang)
< −350	< −256	90% kemungkinan terjadi korosi (kemungkinan tinggi)
< −500	< −406	100% kemungkinan terjadi korosi (kemungkinan sangat tinggi)

2.3.3 Kedalaman Ion Klorida

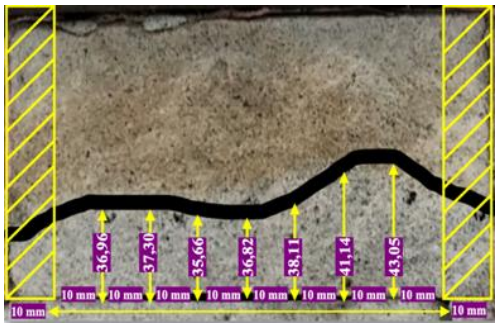
Ion klorida merupakan pemicu utama depassivasi film pelindung pada baja tulangan. Pengujian penetrasi ion klorida dilakukan dengan metode difusi curah sesuai ASTM C1556-11a. **Gambar 4** menunjukkan contoh pelaksanaan uji dan pembacaan front klorida. Secara visual, batas penetrasi ditandai perubahan warna saat permukaan potongan spesimen disemprot larutan $AgNO_3$; zona kaya klorida membentuk garis batas yang dapat diukur pada beberapa titik. Kedalaman penetrasi rata-rata dihitung menggunakan Persamaan (2).

Penetration depth = $\frac{\sum d_i}{n}$ ……..(2)

dengan:

di = kedalaman penetrasi pada titik ke-i(mm),

n = jumlah titik pengukuran (7 titik).



Gambar 4. Ilustrasi pengujian kedalaman penetrasi ion klorida dan penentuan front klorida menggunakan $AgNO_3$

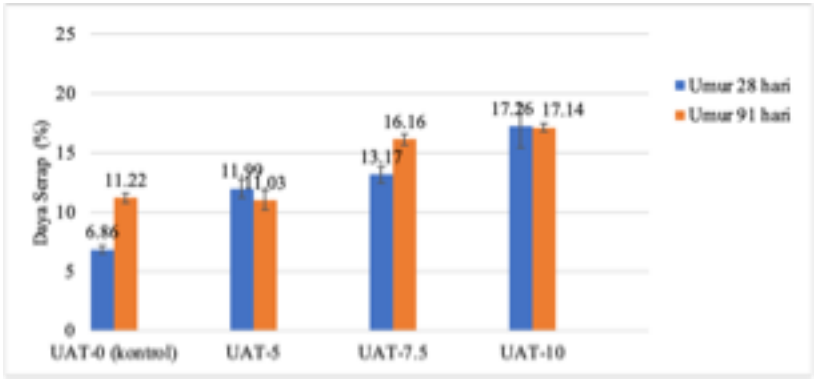
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Daya Serap

Gambar 5 memperlihatkan perbandingan nilai daya serap pada umur 28 dan 91 hari, yang menggambarkan perubahan karakteristik porositas mortar akibat substitusi ultrafine ampas teh. Pada umur 28 hari, campuran normal memperlihatkan nilai daya serap paling rendah (≈6,86%), menunjukkan kepadatan mikrostruktur yang relatif tinggi karena hidrasi semen telah berlangsung dengan optimal tanpa adanya partikel substituen yang mengganggu pembentukan gel C–S–H. Penambahan ultrafine ampas teh sebesar 5% meningkatkan daya serap menjadi ≈11,99%, mengindikasikan adanya pori tambahan yang terbentuk akibat fase awal distribusi partikel limbah yang belum sepenuhnya berperan sebagai pengisi mikro. Sementara itu, pada kadar 7,5% dan 10%, nilai daya serap meningkat lebih signifikan (≈13,17% dan ≈17,26%), menandakan terbentuknya konektivitas pori yang lebih tinggi akibat aglomerasi partikel halus dan keterbatasan air dalam proses hidrasi pada kadar substitusi yang berlebihan.

Pada 91 hari, campuran 5% mengalami penurunan daya serap hingga ≈11,03%, dan nilainya mendekati campuran kontrol (≈11,22%). Fenomena ini menunjukkan adanya reaksi lanjutan antara silika amorf dalam ampas teh dan $Ca(OH)_2$ hasil hidrasi semen, yang menghasilkan C–S–H sekunder dan memperkuat struktur mikro seiring waktu. Sementara itu, kadar 7,5% dan 10% tetap menunjukkan nilai daya serap yang tinggi (≈16,16% dan ≈17,14%), memperlihatkan bahwa kelebihan partikel ultrafine dapat menimbulkan distribusi air yang tidak merata dan menambah volume pori kapiler yang saling terhubung. Pola ini mempertegas bahwa kadar rendah memiliki kecenderungan menutup pori efektif seiring kematangan hidrasi, sedangkan kadar yang lebih tinggi

justru berpotensi meningkatkan konektivitas pori (Tabish dkk., 2022; Qu dkk., 2022; Schlupp dkk., 2023). Kecenderungan penurunan nilai daya serap pada umur lanjut untuk campuran 5% sejalan dengan terjadinya reaksi pozolanik sekunder antara kandungan silika aktif dalam ampas teh dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) yang dihasilkan selama hidrasi semen. Reaksi ini berkontribusi pada pembentukan produk C–S–H baru yang memperkecil ukuran pori serta memperkuat ikatan antarpartikel dalam pasta semen, sebagaimana diuraikan oleh Ridhayani dkk. (2023), Noor dkk. (2025), dan Patah dkk. (2024). Hasil ini juga selaras dengan laporan bahwa penambahan Supplementary Cementitious Materials (SCM) berukuran halus mampu memperbaiki packing density, mengisi rongga mikro yang tersisa, dan menurunkan konektivitas pori efektif dalam sistem matriks semen (Li dkk., 2024). Secara praktis, penurunan nilai daya serap air berasosiasi langsung dengan peningkatan ketahanan terhadap penetrasi air maupun ion agresif, yang berimplikasi pada peningkatan durabilitas mortar terhadap lingkungan korosif (Patah dkk., 2025; Patah dkk., 2024). Efek lingkungan seperti suhu, kelembapan, serta riwayat perawatan (curing history) turut memengaruhi proses difusi dan serapan air; mikrostruktur yang lebih rapat dengan pori-pori terdistribusi halus terbukti dapat memperlambat laju ingress ion klorida ke dalam matriks mortar (Tong dkk., 2025). Oleh karena itu, kombinasi 5% substitusi ultrafine ampas teh dinilai paling optimal dalam menyeimbangkan efek filler dan pozolanik sekunder tanpa mengorbankan kekuatan mekanik. Temuan ini juga memperkuat laporan sebelumnya mengenai pemanfaatan limbah ampas teh dalam jumlah terbatas sebagai bahan tambah yang efektif untuk meningkatkan ketahanan mortar terhadap penetrasi air dan ion (Patah dan Dasar, 2022).



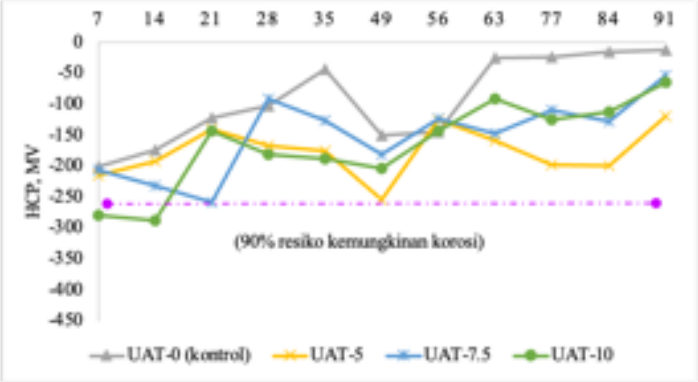
Gambar 5. Grafik perbandingan daya serap umur 28 dan 91 hari.

3.2 Half-Cell Potential (HCP)

Gambar 6 memperlihatkan perkembangan nilai HCP pada berbagai umur pengujian, yang menggambarkan dinamika proses pasivasi baja tulangan dalam sistem mortar dengan variasi kadar ultrafine ampas teh (UAT). Nilai potensial menunjukkan kecenderungan bergerak lebih positif seiring bertambahnya umur, menandakan penurunan probabilitas korosi karena meningkatnya ketertutupan pori dan terbentuknya lapisan pasif yang lebih stabil pada permukaan tulangan. Pada umur awal (7–28 hari), sebagian besar variasi masih berada pada kategori sedang hingga tinggi, sesuai klasifikasi ASTM C876-22b dengan elektroda Ag/AgCl, yang menunjukkan bahwa kondisi mikrostruktur mortar masih belum sepenuhnya padat dan memungkinkan difusi oksigen serta ion klorida ke permukaan baja (Capasso dkk., 2024).

Memasuki umur 91 hari, terlihat adanya perbaikan elektrokimia yang signifikan, di mana beton normal (tanpa ampas teh) memperlihatkan performa terbaik dengan nilai potensial sekitar −12,5 mV, yang termasuk dalam kategori risiko korosi rendah. Campuran dengan ultrafine ampas teh 7,5% dan 10% juga menunjukkan kategori rendah, masing-masing sebesar −52,7 mV dan −64,1 mV, menandakan bahwa pada kadar menengah hingga tinggi, terbentuk lapisan pelindung (passive film) yang cukup stabil di sekitar tulangan baja. Sebaliknya, kadar 5% masih menunjukkan nilai sekitar −117,9 mV, yang diklasifikasikan sebagai kategori sedang, sehingga efek perlindungan belum sepenuhnya maksimal. Perbedaan antara hasil daya serap dan hasil HCP sebenarnya dapat dijelaskan melalui faktor kimia larutan pori yang berbeda sensitivitasnya terhadap porositas. Pada campuran

7,5% dan 10%, meskipun nilai serapan air lebih tinggi (menunjukkan porositas yang lebih besar), keberadaan karbon aktif serta senyawa organik dari ampas teh cenderung bersifat corrosion-inhibiting. Senyawa ini dapat membentuk lapisan adsorpsi tipis pada permukaan baja, sehingga menurunkan aktivitas korosi dan menghasilkan nilai HCP yang lebih positif. Sebaliknya, pada kadar 5%, meskipun porositas lebih rendah dan nilai serapan lebih baik, jumlah inhibitor alami tersebut belum cukup untuk memberikan perlindungan elektrokimia yang optimal. Oleh karena itu, kadar 5% terlihat paling baik pada parameter transport (serapan), tetapi belum menunjukkan peningkatan yang sama pada indikator elektrokimia (HCP). Perbedaan perilaku ini menggambarkan pengaruh komposisi pozolanik dan distribusi pori terhadap kestabilan potensial elektroda. Pada kadar rendah, efek filler dari partikel ultrafine memang membantu mengurangi porositas total, tetapi belum cukup untuk meningkatkan resistivitas elektrolit secara signifikan. Pada kadar menengah dan tinggi (7,5–10%), interaksi kimia antara karbon aktif, silika amorf, dan ion $Ca(OH)_2$ dari semen menghasilkan reaksi sekunder yang memperbaiki struktur matriks serta menurunkan kandungan ion bebas dalam pori, sehingga meminimalkan aktivitas elektrokimia yang memicu korosi. Hal ini sejalan dengan pendekatan probabilistik modern dalam analisis data HCP yang mempertimbangkan pengaruh kondisi lingkungan dan variasi komposisi material terhadap estimasi probabilitas korosi (Guo dkk., 2024). Tren perbaikan potensial ini juga konsisten dengan mekanisme pemadatan mikrostruktur dan peningkatan resistivitas listrik akibat keberadaan material pozolanik ultrahalus. Reaksi antara partikel halus ampas teh dan produk hidrasi semen menghasilkan gel C–S–H tambahan yang menutup jalur migrasi ion agresif dan memperlambat proses depassivasi baja tulangan (Patah dkk., 2025). Dalam jangka panjang, kombinasi antara mikrostruktur yang lebih rapat dan lapisan pelindung stabil di sekitar tulangan berperan penting dalam menggeser nilai potensial ke arah yang lebih positif. Selain itu, praktik pemetaan HCP modern semakin menekankan pentingnya interpretasi berbasis sebaran spasial (spatial variability) untuk mendeteksi zona-zona berisiko dalam struktur beton bertulang (Pfändler dkk., 2022). Penerapan konsep ini memungkinkan peneliti menilai variasi lokal potensial korosi dan menghubungkannya dengan faktor heterogenitas mikrostruktur. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kombinasi partikel berukuran halus dan kematangan hidrasi pada umur lanjut memberikan efek sinergis terhadap peningkatan resistivitas dan kestabilan lapisan pasif, sehingga mengarahkan sistem mortar ke kondisi elektrokimia yang lebih aman dan tahan terhadap korosi (Patah dkk., 2025; Noor dkk., 2025).



Gambar 6. Grafik perubahan nilai HCP benda uji terhadap waktu.

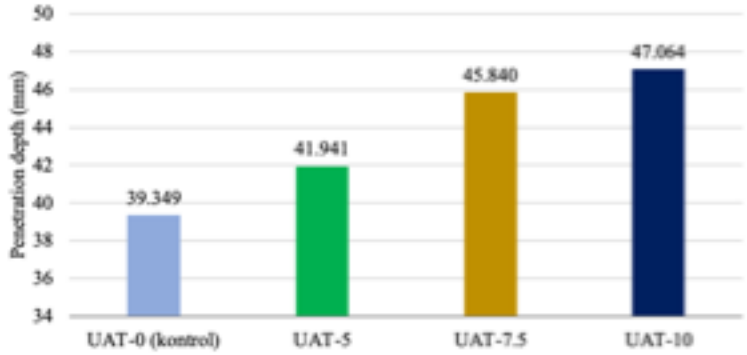
3.3 Kedalaman Ion Klorida

Gambar 7 menunjukkan perbandingan hasil pengujian penetrasi ion klorida pada umur 28 hari untuk setiap variasi campuran mortar dengan substitusi ultrafine ampas teh. Nilai kedalaman penetrasi yang diperoleh menggambarkan tingkat kemampuan ion klorida menembus struktur pori mortar, yang erat kaitannya dengan porositas efektif, konektivitas pori, serta kepadatan mikrostruktur hasil proses hidrasi semen dan reaksi pozolanik sekunder.

Pada umur 28 hari, campuran normal memperlihatkan kedalaman penetrasi paling rendah, yaitu sekitar 39,349 mm, menunjukkan kepadatan mikrostruktur yang baik dan minim jalur transport ion. Campuran dengan 5% ultrafine ampas teh memberikan kinerja terbaik di antara variasi limbah teh dengan nilai 41,941 mm, menandakan bahwa substitusi rendah mampu mempertahankan ketertutupan pori dan pada saat bersamaan memberikan sedikit efek pengisian (filler effect). Sementara itu, peningkatan kadar ampas teh hingga 7,5% dan 10% menghasilkan nilai kedalaman yang lebih tinggi, masing-masing 45,840 mm dan 47,064 mm, yang menunjukkan bahwa pada dosis di atas 5% terjadi peningkatan konektivitas pori dan kemungkinan terbentuknya pori mikro yang saling terhubung. Kondisi ini mempercepat difusi ion klorida, sebab air dan ion

dapat bergerak lebih mudah melalui jaringan pori yang terbuka (Noor dkk., 2025; Patah dkk., 2024; Patah dan Dasar, 2022; Caronge dkk., 2022; Wang dan Dong, 2023). Fenomena tersebut memperlihatkan bahwa efek pozolanik dan efek pengisian hanya memberikan keuntungan nyata pada kadar substitusi yang rendah. Pada kadar optimum sekitar 5%, partikel ultrafine ampas teh berperan sebagai pengisi mikro (micro-filler) yang mengisi rongga antarpartikel semen dan memperkecil ukuran pori kapiler. Selain itu, reaksi antara silika aktif dari ampas teh dengan $Ca(OH)_2$ hasil hidrasi semen membentuk produk C–S–H sekunder, yang meningkatkan densitas matriks mortar. Namun, bila kadar partikel ultrafine terlalu tinggi, partikel tersebut dapat bertindak sebagai penghalang hidrasi lokal, menyebabkan sebagian semen tidak bereaksi sempurna, yang berakibat pada peningkatan porositas total dan menurunnya ketahanan terhadap difusi klorida.

Konsistensi hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang melaporkan bahwa abu halus dalam jumlah terbatas dapat menurunkan kedalaman penetrasi ion klorida melalui peningkatan densitas mikrostruktur dan penurunan permeabilitas pasta semen (Noor dkk., 2025; Patah dkk., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian kadar bahan pozolanik berukuran halus merupakan faktor kritis untuk mencapai keseimbangan antara reaktivitas kimia dan pengaruh fisik terhadap struktur pori. Selain itu, temuan ini didukung oleh telaah dan pemodelan mikrostruktur modern yang menunjukkan adanya hubungan kuantitatif antara parameter pori (ukuran, distribusi, dan konektivitas) dengan mekanisme transport ion klorida pada material berbasis semen (Xu dan Ye, 2023; Tong dkk., 2024). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa substitusi 5% ultrafine ampas teh merupakan batas optimum untuk memperbaiki ketahanan mortar terhadap penetrasi ion klorida tanpa mengorbankan kepadatan mikrostruktur. Nilai ini menegaskan pentingnya kontrol terhadap ukuran partikel dan rasio air terhadap pengikat (w/b), karena kombinasi faktor tersebut secara langsung memengaruhi koefisien difusi klorida serta durabilitas jangka panjang sistem mortar pada lingkungan yang mengandung ion agresif.



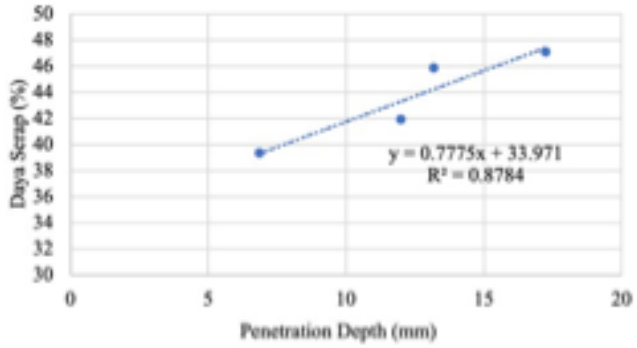
Gambar 7. Grafik perbandingan pengujian kedalaman ion klorida umur 28 hari.

Gambar 8 menunjukkan hubungan linear antara daya serap air (%) dan kedalaman penetrasi ion klorida (mm) pada variasi campuran mortar dengan substitusi ultrafine ampas teh. Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y=0{,}7775x+33{,}971$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8784, yang mengindikasikan korelasi positif kuat antara kedua parameter tersebut. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa sekitar 87,84% variasi daya serap dapat dijelaskan oleh perubahan kedalaman penetrasi ion klorida, sehingga dapat disimpulkan bahwa mekanisme transport air dan ion klorida dalam mortar saling berkaitan secara signifikan.

Secara fisik, peningkatan porositas efektif dan konektivitas pori menyebabkan peningkatan baik pada nilai daya serap maupun pada kedalaman penetrasi ion klorida. Ketika jaringan pori terbuka dan terhubung secara kontinu, air yang diserap ke dalam sistem mortar juga menjadi medium penghantar ion klorida menuju permukaan baja tulangan. Fenomena ini memperkuat hubungan sebab-akibat antara tingkat penyerapan air dan laju difusi ion, sebagaimana dijelaskan dalam pembahasan sebelumnya bahwa efek pengisian partikel ultrafine hanya efektif pada kadar rendah, sementara pada kadar di atas optimum terbentuk jalur pori baru yang mempercepat difusi (Noor dkk., 2025; Patah dkk., 2024; Patah dan Dasar, 2022; Caronge dkk., 2022; Wang dan Dong, 2023).

Hubungan linear yang diperoleh juga sejalan dengan temuan eksperimental bahwa peningkatan densitas mikrostruktur melalui reaksi pozolanik sekunder dapat menekan nilai daya serap dan menghambat migrasi ion klorida secara bersamaan (Noor dkk., 2025; Patah dkk., 2024). Dengan demikian, grafik pada Gambar 8 memperkuat interpretasi bahwa porositas merupakan faktor dominan dalam mengontrol mekanisme transport ganda—baik air maupun ion klorida—di dalam mortar. Oleh sebab itu, komposisi 5% ultrafine ampas teh,

yang sebelumnya terbukti menghasilkan nilai daya serap dan kedalaman penetrasi terendah, dapat dipandang sebagai kondisi optimum untuk mencapai ketahanan transport yang seimbang dalam sistem mortar berbasis limbah teh.



Gambar 8. Hubungan antara daya serap air dan kedalaman penetrasi ion klorida pada variasi campuran mortar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan ultrafine ampas teh sebagai substitusi parsial semen pada mortar berpotensi meningkatkan durabilitas sekaligus mendukung keberlanjutan material. Dengan empat kadar substitusi (0; 5; 7,5; 10%) dan pengujian menurut ASTM C642, C876, dan C1556, diperoleh bahwa 5% merupakan kadar paling efektif untuk mengendalikan mekanisme transport: nilai daya serap pada 91 hari turun hingga 11,03% (mendekati kontrol 11,22%) dan kedalaman penetrasi klorida terendah di antara campuran ampas teh (41,941 mm; kontrol 39,349 mm). Untuk indikator elektrokimia, campuran 7,5% menghasilkan probabilitas korosi terendah (−52,7 mV, kategori risiko rendah), diikuti 10% (−64,1 mV), sedangkan 5% masih kategori sedang (≈−117,9 mV). Secara mekanistik, kadar rendah memanfaatkan sinergi efek pengisian (filler) dan reaksi pozolanik sekunder yang memadatkan mikrostruktur, sementara peningkatan kadar di atas optimum cenderung menambah konektivitas pori dan mempercepat difusi ion. Implikasinya, rentang desain 5–7,5% direkomendasikan: 5% dipilih ketika target utama adalah hambatan serapan/ingress klorida, sedangkan 7,5% ketika fokus pada penurunan peluang korosi; keduanya perlu ditopang pengendalian w/b dan curing yang baik. Secara keseluruhan, ampas teh ultrahalus layak dipertimbangkan sebagai material tambah berbasis limbah untuk mortar berketahanan tinggi, dengan catatan verifikasi mikrostruktur dan statistik lanjutan disarankan pada studi berikutnya.

Daftar Pustaka

Adriman, R., Ibrahim, I.B.M., Huzni, S., Fonna, S. and Ariffin, A.K., 2022. Improving Half-Cell Potential Survey through Computational Inverse Analysis for Quantitative Corrosion Profiling. Case Studies in Construction Materials, 16, e00854. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00854.

Almashakbeh, Y., Saleh, E. dan Al-Akhras, N.M., 2022. Evaluation of Half-Cell Potential Measurements for Reinforced Concrete Corrosion. Coatings, 12(7), p.975.

ASTM C1556-11. (2011). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C188-17. (2017). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C642-13. (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C876-22b. (2022). Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Badan Standardisasi Nasional. (1992). SNI 03-2816-1992: Metode Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 03-7064-2004: Air untuk Beton. Jakarta: BSN.

Badan Standardisasi Nasional. (2004). SNI 15-2049-2004: Semen Portland. Jakarta: BSN.

Capasso, M., Carusi, V., Forte, A., Lavorato, D., Raoli, G. & Santini, S., 2024. A probabilistic interpretation of corrosion state through half-cell potential and electrical resistivity measures: The Flaminio Bridge in Rome. Case Studies in Construction Materials, 20, e03197. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03197.

Dasar, A., Patah, D. and Okviyani, N., 2025. Impact of incorporating nano-palm oil fuel ash on the mechanical properties and durability of paving blocks prepared with seawater and sea sand for sustainable construction. Construction and Building Materials, 481, p.141539.

Dasar, A., Patah, D., Caronge, M.A., Mahmuddin, F. and Apriansyah, A., 2024. Strength and Durability of Paving Block with Seawater and POFA (Palm Oil Fuel Ash). Key Engineering Materials, 1000, pp.11-22.

Guo, Z., Guo, R. & Yao, G., 2024. Bayesian probabilistic model for reinforcement corrosion ratio of reinforcement in concrete prediction based on modified half-cell potential. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 14, 485–500. https://doi.org/10.1007/s13349-023-00738-w.

Horma, O., Charai, M., El Hassani, S., El Hammouti, A. and Mezrhab, A., 2022. Thermo-physical and mechanical characterization of cement-based mortar incorporating spent tea. Journal of Building Engineering, 52, p.104392..

Jakhrani, S.H., Kumar, A., Siddique, J.A. and Keryio, J.A., 2025. Effect of Tea Waste Particles on Chloride Ion Penetration in Cement-Based Mortars. Journal of Asian Development Studies, 14(1), pp.1185-1194.

Karo Karo, P., 2020. Pengaruh Variasi Penambahan Abu Ampas Tebu dan Serat Ampas Tebu Terhadap Sifat Fisis dan Mekanis Pada Mortar. Jurnal Fisika Indonesia, 24(3), pp.118-124.

Li, L., Su, L., Guo, B., Cai, R., Wang, X., & Zhang, T. (2024). Prediction and prevention of concrete chloride penetration: machine learning and MICP techniques. Frontiers in Materials, 11, 1445547. https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1445547.

Nasr, M.S., Hasan, Z.A. and Abed, M.K., 2019. Mechanical properties of cement mortar made with black tea waste ash as a partial replacement of cement. Engineering and Technology Journal, 37(1), pp.45-48.

Noor, N.M., Yusaini, H.Y., Patah, D., Dasar, A. and Irmawaty, R., 2025, February. The Effect of Utilising Coal Ash as Substitutes for Cement and Sand on Compressive Strength and Water Permeability of Concrete. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1453, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.

Nur, N., 2024. Kekuatan Dan Durabilitas Baja Tulangan Pada Beton Menggunakan Pasir Pantai (Doctoral dissertation, Universitas Sulawesi Barat).

Patah, D. and Dasar, A., 2022, September. Strength performance of concrete using rice husk ash (RHA) as supplementary cementitious material (SCM). In Journal of The Civil Engineering Forum (pp. 261-276)..

Patah, D., Dasar, A. and Noor, N.M., 2025, January. The Effects of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical and Durability Properties of Sustainable Foamed Concrete. In Journal of the Civil Engineering Forum (pp. 75-84).

Patah, D., Dasar, A. and Nurdin, A., 2022. Durabilitas Baja Tulangan pada Beton Menggunakan Material Batu Gamping, Pasir Laut dan Air Laut dalam Campuran Beton. Media Komunikasi Teknik Sipil, 28(1), pp.109-117.

Patah, D., Dasar, A., Fakhruddin, F., Shintarahayu, B. and Apriansyah, A., 2024. The impact of fly ash and sea sand on strength and durability of concrete. Key Engineering Materials, 1000, pp.23-33.

Patah, D., Dasar, A., Ridhayani, I., Suryani, H., Saudi, A.I. and Sainuddin, S., 2024. Kekuatan dan Durabilitas Oil Palm Shell (OPS) sebagai Alternatif Pengganti Agregat Kasar pada Beton Bertulang. JTT (Jurnal Teknologi Terpadu), 12(1), pp.80-87.

Pfändler, P., Keßler, S., Huber, M. & Angst, U., 2022. Spatial variability of half-cell potential data from a reinforced concrete structure—A geostatistical analysis. Structure and Infrastructure Engineering, 20(11), 1698–1713.

Qu, L., Song, W., Wang, Q., Xu, S., & Hou, C. (2022). Effects of hydrophobic modified fly ash on resistance of chloride corrosion and water penetration of cement mortar in the early hydration stage. Journal of Building Engineering, 60, 105573.

Ridhayani, I., Dasar, A., Mahmuda, A., Manaf, A. and Patah, D., 2023. Perbandingan kinerja bata beton menggunakan abu cangkang sawit, abu sekam padi dan abu serat sagu. JTT (Jurnal Teknologi Terpadu), 11(2), pp.241-248.

Rodulfo, P., Wang, B., Gupta, R., Sharma, L. dan Mukhopadhyaya, P., 2023. Relationship between electrical conductivity, half-cell potential, linear polarization resistance and macrocell current of cementitious repair materials. Construction and Building Materials, 401, p.132733.

Schlupp, F., Page, J., Djelal, C., & Libessart, L. (2023). Use of biomass bottom ash as granular substitute in mortar. Journal of Building Engineering, 69, 106927.

Tabish, M., Zaheer, M.M., & Baqi, A. (2022). Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review. Journal of Building Engineering, 57, 105676.

Tong, L.-Y., Šavija, B., Zhang, M., Xiong, Q.X., & Liu, Q.-F. (2025). Chloride penetration in concrete under varying humidity and temperature changes: A numerical study. Construction and Building Materials, 458, 138380.

Tong, L., Xiong, Q.X., Zhang, Z., Chen, X., Ye, G. and Liu, Q.F., 2023. A Novel Lattice Model to Predict Chloride Diffusion Coefficient of Unsaturated Cementitious Materials Based on Multi-Typed Pore Structure Characteristics. Cement and Concrete Research, 176, 107351.

Tong, L.Y., Liu, Q.F., Xiong, Q., Meng, Z., Amiri, O. and Zhang, M., 2024. Modeling the Chloride Transport in Concrete from Microstructure Generation to Chloride Diffusivity Prediction. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 40(9), pp.1129–1149.

Wang, C., Jin, Z., Liu, G., Dong, W., Pang, B. and Ding, X., 2023. Mechanisms of Chloride Transport in Low-Carbon Marine Concrete: An Alkali-Activated Slag System with High Limestone Powder. Journal of Building Engineering, 72, 106539.

Wulandari, M., Zahratussaadah, Z., Nofrizal, N., Radja, P.B. and Andreas, A., 2023. Black Tea Waste as Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in 0.5 M HCl Medium. Indonesian Journal of Chemistry, 23(6), pp.1664-1675.

Xu, Z. dan Ye, G., 2023. Understanding Chloride Diffusion Coefficient in Cementitious Materials. Materials, 16(9), p.3464.

Yusman, A.M. and Mahmuda, A.F., 2024. Produksi batu bata tanah liat yang ramah lingkungan menggunakan palm oil fuel ash (POFA).

Zhuang, S., Wang, Q. dan Zhang, M., 2022. Water absorption behaviour of concrete: Novel experimental findings and model characterization. Journal of Building Engineering, 53, p.104602.

Zuraidah, S. and Hastono, B., 2018. Pengaruh variasi komposisi campuran mortar terhadap kuat tekan. Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil, 1(1), pp.8-13.