Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil **ISSN Print 2685-7553**
Vol. 9 No. 2 Agustus 2025 **ISSN Online 2581-1134**

Sifat Mekanik dan Durabilitas Mortar dengan Substitusi *Nano Eggshell Powder* Menggunakan Air Laut sebagai Media Perawatan

Abdi Manaf[1], Irma Ridhayani*[2], Almayana Alwi[3], Nur Okviyani[4]

[1,2,3,4]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Sulawesi Barat, Indonesia
e-mail: abdimanaf@unsulbar.ac.id , ***irma.ridhayani@unsulbar.ac.id**, almayani.alwi@unsulbar.ac.id, nur.okviyani@unsulbar.ac.id

Abstract

Cement production, the main component of concrete, contributes about 7% of global CO_2 emissions, highlighting the need for sustainable alternatives. Waste eggshells can be processed into Nano Eggshell Powder (NESP) with finer particle size and higher pozzolanic reactivity. This study evaluates mortar incorporating 5% and 10% NESP as partial cement replacement, with seawater from Pangali-Ali Beach, Majene, used as curing medium. Tests included compressive strength, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), water absorption, electrical resistivity, and half-cell potential (HCP) up to 91 days. Results showed that at early ages, NESP mixes had lower strength than control, but improved significantly over time: 5% NESP increased compressive strength by 18% (22.42 to 26.69 MPa) compared to 14% in control. Electrical resistivity of NESP mixes exceeded 190 kΩ·cm at 28 days, 37% higher than control, indicating refined microstructure. Water absorption decreased by up to 24% (5% NESP), showing strong negative correlation with strength. HCP results indicated all mixes gradually shifted toward passive conditions, though the 10% NESP mix remained more negative. Overall, 5% NESP provided the best balance between strength and durability, demonstrating its potential to reduce cement consumption while supporting sustainable concrete development in coastal environments.

Keywords: *Nano Eggshell Powder, seawater curing, compressive strength, electrical resistivity, half-cell potential*

Abstrak

Produksi semen sebagai komponen utama beton menyumbang ±7% emisi CO_2 global, sehingga diperlukan material pengganti ramah lingkungan. Limbah kulit telur berpotensi diolah menjadi Nano Eggshell Powder (NESP) dengan ukuran partikel halus dan reaktivitas pozzolanik tinggi. Penelitian ini mengevaluasi mortar dengan substitusi NESP 5% dan 10%, menggunakan air laut Pangali-Ali, Majene, sebagai media perawatan. Uji yang dilakukan meliputi kuat tekan, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), daya serap air, resistivitas listrik, dan half-cell potential (HCP) hingga umur 91 hari. Hasil menunjukkan pada umur awal campuran dengan NESP memiliki kuat tekan lebih rendah dibanding kontrol, namun meningkat hingga 91 hari: NESP 5% naik 18% dari 22,42 menjadi 26,69 MPa, sedangkan kontrol hanya 14%. Resistivitas campuran dengan NESP mencapai >190 kΩ·cm pada 28 hari (lebih tinggi 37% dibanding benda uji kontrol), menandakan penyempurnaan mikrostruktur. Daya serap air menurun hingga 24% (NESP 5%) dengan korelasi negatif terhadap kuat tekan. HCP semua campuran bergerak menuju kondisi pasif, meskipun NESP 10% tetap lebih negatif. Secara keseluruhan, substitusi 5% NESP memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan durabilitas, sehingga efektif mengurangi konsumsi semen sekaligus mendukung beton berkelanjutan untuk aplikasi pesisir.
Kata kunci: *Nano Eggshell Powder, air laut, kuat tekan, resistivitas, half-cell potential*

1. Pendahuluan

Mortar sebagai representasi skala laboratorium dari beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan untuk mengevaluasi sifat mekanik dan durabilitas sebelum diaplikasikan pada beton struktural (El Naggar et al., 2025; Akhtar, 2023). Beton sendiri dikenal karena kekuatan dan ketahanannya yang tinggi, namun produksi semen sebagai komponen utamanya menimbulkan permasalahan lingkungan serius, terutama karena menyumbang sekitar 7% emisi karbon dioksida (CO_2) global (Nematchoua et al., 2021; Mlitan et al., 2023; Hoang et al., 2025). Kondisi ini mendorong upaya mencari material pengganti sebagian semen yang lebih ramah lingkungan.

Salah satu alternatif yang mendapat perhatian adalah pemanfaatan limbah organik, khususnya kulit telur, yang dihasilkan dalam jumlah besar dari rumah tangga maupun industri makanan. Apabila tidak dikelola, limbah ini berpotensi mencemari lingkungan (Al-Taai, 2022; Abubakar et al., 2022). Kulit telur mengandung sekitar 94% kalsium karbonat ($CaCO_3$) serta mineral lain dalam jumlah kecil, sehingga mirip dengan batu kapur yang menjadi bahan baku semen (Budžaki et al., 2022; Waheed et al., 2020). Sejumlah penelitian melaporkan bahwa eggshell powder (ESP) dapat meningkatkan hidrasi semen, memperbaiki sifat mekanik mortar/beton, serta mendukung praktik konstruksi berkelanjutan (He et al., 2022; Yuan, 2018; Hamada et al., 2020).

Seiring perkembangan teknologi material, kulit telur dapat diolah lebih lanjut menjadi partikel nano atau Nano Eggshell Powder (NESP). Ukuran partikel yang lebih halus ini berpotensi meningkatkan reaktivitas pozzolanik, memperbaiki mikrostruktur, dan menurunkan porositas, sehingga secara langsung berpengaruh terhadap sifat mekanik dan durabilitas mortar (Fode et al., 2023; Paruthi et al., 2023). Inovasi ini menjadikan NESP menarik untuk diteliti sebagai bahan substitusi semen berkelanjutan.

Selain permasalahan material pengikat, isu lain yang juga penting adalah ketersediaan air tawar untuk curing beton. Tantangan ini semakin nyata di wilayah pesisir, di mana air laut menjadi sumber daya yang lebih mudah diperoleh. Sejumlah studi telah meneliti air laut sebagai media curing karena ketersediaannya yang melimpah, meskipun kandungan ion klorida di dalamnya berpotensi mempercepat korosi tulangan (Fernando, 2022; Patah & Dasar, 2023; Dasar et al., 2025). Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi komprehensif mengenai kombinasi NESP dan air laut, khususnya pada mortar, untuk menilai kinerja baik dari aspek kekuatan mekanik maupun ketahanan terhadap lingkungan agresif.

Evaluasi performa mortar dalam penelitian ini dilakukan melalui berbagai parameter uji yang mencakup kuat tekan sebagai indikator utama sifat mekanik, Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPVT) untuk menilai homogenitas internal (Van Ho et al., 2023; Kuzielová et al., 2020), serta aspek durabilitas yang diwakili oleh daya serap air untuk permeabilitas, resistivitas listrik sebagai indikator ketahanan terhadap penetrasi ion klorida, dan half-cell potential (HCP) untuk probabilitas korosi (Ariyagoundar et al., 2025; Patah et al., 2025). Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi penggunaan NESP pada mortar dengan media perawatan air laut, sekaligus menegaskan kontribusinya terhadap pengembangan material beton berkelanjutan di wilayah pesisir.

2. Metode Penelitian

2.1 Material

Penelitian ini menggunakan *Portland Composite Cement* (PCC) sebagai bahan pengikat utama dengan *specific gravity* 3,08 sesuai dengan SNI 15-7064-2004. Agregat halus yang digunakan adalah pasir alami yang berasal dari Sungai Mappili, Sulawesi Barat, dengan specific gravity 2,36. Penelitian ini difokuskan pada mortar sehingga tidak melibatkan agregat kasar dalam komposisinya. Air yang digunakan terdiri atas dua jenis, yaitu air bersih (*tap water*) untuk proses pencampuran serta air laut sebagai media perawatan (*curing*). Air laut diperoleh dari Pantai Pangali-Ali, Kabupaten

Majene, Sulawesi Barat, dan digunakan tanpa perlakuan kimia tambahan. Untuk menjaga kestabilan pH, air laut pada media perendaman diganti setiap tujuh hari sekali selama periode perawatan.

Bahan tambah yang digunakan sebagai pengganti parsial semen adalah *Nano Eggshell Powder* (NESP) yang diperoleh dari limbah kulit telur ayam, dikumpulkan dari pedagang kue lokal di Sulawesi Barat. Proses persiapan NESP meliputi tahapan pencucian kulit telur untuk menghilangkan kotoran organik, pengeringan awal dengan penjemuran, penghancuran manual menjadi fragmen kecil, dan pengeringan oven pada suhu 110 °C selama 20–24 jam untuk memastikan dehidrasi sempurna. Setelah itu, kulit telur kering digiling dua kali menggunakan *disk mill* hingga lolos saringan berukuran 50 µm, menghasilkan bubuk halus dengan tekstur seragam (Gambar 1). NESP yang diperoleh kemudian disimpan dalam wadah tertutup rapat untuk mencegah penyerapan kelembaban sebelum digunakan pada pencampuran mortar. Secara fisik, NESP berwarna terang dengan tekstur halus yang menunjukkan tingkat kehalusan yang baik, serta memiliki *specific gravity* sebesar 2,79, lebih rendah dibandingkan PCC. Karakteristik ini berkontribusi terhadap penurunan densitas segar campuran ketika digunakan sebagai substitusi parsial semen.

2.2 Desain Campuran dan Persiapan Benda Uji

Seluruh campuran mortar dalam penelitian ini disiapkan dengan rasio air terhadap bahan pengikat (w/b) konstan sebesar 0,40. Variasi campuran dirancang dengan menggantikan sebagian semen PCC menggunakan NESP pada tingkat penggantian 0%, 5% dan 10% dari berat semen. Rincian proporsi campuran dapat dilihat pada Tabel 1. Empat variasi campuran disiapkan, yaitu N-TT (kontrol dengan 100% PCC dan perawatan air tawar), N-TS (kontrol dengan 100% PCC dan perawatan air laut), ESA-TS (substitusi 5% PCC dengan NESP, perawatan air laut), serta ESB-TS (substitusi 10% PCC dengan NESP, perawatan air laut) Campuran tidak menggunakan agregat kasar, melainkan hanya terdiri atas semen atau campuran semen–NESP, agregat halus, dan air.

Proses pencampuran dilakukan menggunakan rotary drum mixer berkapasitas 20 L. Tahap awal dilakukan dengan mencampurkan semen atau campuran semen–NESP dengan agregat halus dalam kondisi kering selama 30 detik untuk memastikan distribusi merata dari bahan pengikat. Setelah itu, air dengan volume yang telah ditentukan ditambahkan secara bertahap sambil dilakukan pengadukan selama 2 menit. Untuk menghindari segregasi material, dilakukan pengikisan manual pada dinding dan dasar mixer, kemudian dilanjutkan dengan pengadukan tambahan selama 1 menit hingga diperoleh campuran mortar segar yang homogen. Benda uji dicetak ke dalam cetakan dengan ukuran dan bentuk yang berbeda sesuai dengan jenis pengujian yang akan dilakukan. Untuk pengujian kuat tekan, electrical resistivity dan daya serap air digunakan cetakan berbentuk kubus berukuran 50 mm × 50 mm × 50 mm. Untuk pengujian UPV digunakan cetakan silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Sementara itu, pengujian HCP menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan tinggi 100 mm, di mana ditanamkan batang baja polos berdiameter 10 mm di bagian tengah untuk mensimulasikan kondisi beton bertulang. Seluruh benda uji dipadatkan menggunakan meja getar guna meminimalkan terperangkapnya udara.

Setelah proses pengecoran, cetakan ditutup dengan lembaran plastik untuk mencegah kehilangan kelembaban dan didemolding setelah 20–24 jam. Selanjutnya, benda uji direndam dalam air laut hingga mencapai umur pengujian yang telah ditentukan. Prosedur ini dilakukan untuk mensimulasikan kondisi perawatan beton pada lingkungan pesisir dengan kandungan ion klorida alami.



Gambar 1. Tampilan fisik dan kehalusan partikel NESP

Tabel 1. Proporsi campuran mortar dengan variasi NESP

Mix ID	PCC	NESP		Pasir	Air
	100%	5%	10%		
N-TT	580	0	0	1223	232
N-TS	580	0	0	1223	232
ESA-TS	551	29	0	1220	232
ESB-TS	522	0	58	1218	232

2.3 Metode Pengujian

2.3.1 Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan benda uji berbentuk kubus berukuran 50 mm × 50 mm × 50 mm sesuai standar ASTM C109/C109M-16a. Benda uji diletakkan pada mesin uji tekan hidrolik dengan kapasitas 3000 kN. Pengujian dilakukan pada umur perawatan 7, 28, dan 91 hari menggunakan mesin uji tekan digital dengan laju pembebanan konstan sebesar 0,5 MPa/s. Untuk setiap variasi campuran dan umur pengujian, nilai kuat tekan dilaporkan berdasarkan rata-rata dari tiga benda uji. Nilai kuat tekan dihitung dengan persamaan (1).

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dengan fc′ = kuat tekan (MPa), P = beban maksimum (N), dan A = luas penampang benda uji (mm^2).

2.3.1 Ultrasonic Pulse Velocity Test (UPVT)

Pengujian UPV dilakukan pada umur 28 dan 91 hari dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm, sesuai dengan standar ASTM C597:2016. Pengukuran kecepatan rambat gelombang ultrasonik dilakukan menggunakan *Ultrasonic Pulse Velocity Tester Pundit Lab+* (Proceq, Switzerland) dengan transduser berfrekuensi 54 kHz yang ditempatkan sepanjang sumbu vertikal benda uji. Untuk setiap benda uji, pengukuran dilakukan pada tiga titik, kemudian nilai rata-rata dilaporkan sebagai hasil akhir. Kriteria kualitas beton berdasarkan nilai UPV ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria kualitas beton berdasarkan nilai UPV (ASTM C597-16)

Kecepatan Gelombang (km/s)	Kualitas Beton
> 4.5	Sangat baik (*Excellent*)
3.5 – 4.5	Baik (*Good*)
3.0 – 3.5	Sedang (*Questionable*)
2.0 – 3.0	Buruk (*Poor)*
< 2.0	Sangat buruk (*Very poor*)



Gambar 2. Pengaturan pengujian UPV

2.3.1 Uji Daya Serap Air

Pengujian daya serap air dilakukan pada benda uji kubus 50 mm berdasarkan ASTM C642-13. Benda uji dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C hingga berat konstan, kemudian direndam dalam air hingga jenuh. Nilai daya serap dihitung dengan persamaan (2).

$$WA\ (\%) = \frac{W_{sat} - W_{dry}}{W_{dry}}\ x\ 100 \qquad (2)$$

Dengan WA = daya serap air (%), W_{sat} = berat benda uji jenuh (g), dan W_{dry} = berat benda uji kering oven (g).

2.3.1 Electrical Resistivity

Pengujian resistivitas listrik dilakukan berdasarkan standar ASTM B193-20. Metode ini pada dasarnya digunakan untuk menentukan resistivitas bahan konduktor listrik dengan mengukur tahanan listrik dan menghubungkannya dengan dimensi spesimen uji. Dalam penelitian ini, prinsip uji tersebut diadaptasi untuk benda uji beton dengan menggunakan metode empat titik (*four-point probe*). Dua elektroda luar digunakan untuk menginjeksikan arus listrik ke dalam spesimen, sementara dua elektroda dalam digunakan untuk mengukur beda potensial listrik yang timbul pada permukaan beton. Nilai resistivitas (ρ) kemudian dihitung menggunakan persamaan (3).

$$\rho = R\frac{A}{L} \qquad (3)$$

dengan ρ = resistivitas (Ω·cm), R = tahanan listrik terukur (Ω), A = luas penampang arus (cm^2), dan L = panjang lintasan arus (cm).

Metode ini memungkinkan penentuan nilai resistivitas berdasarkan sifat intrinsik material terhadap hantaran listrik. Semakin tinggi nilai resistivitas, semakin kecil kemampuan beton dalam menghantarkan arus, yang diinterpretasikan sebagai indikasi meningkatnya kepadatan mikrostruktur

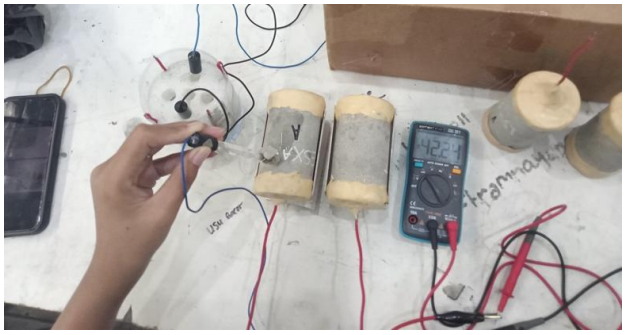
dan menurunnya mobilitas ion di dalam pori-pori beton. Kriteria risiko korosi berdasarkan resistivitas beton sesuai Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria risiko korosi berdasarkan resistivitas beton (ASTM B193-20)

Resistivitas (kΩ-cm)	Tingkat Risiko Korosi
>100-200	Sangat Rendah
50-100	Rendah
10-50	Menengah
<10	Tinggi

2.3.1 Half-Cell Potential

Evaluasi potensial korosi pada baja tulangan yang terbenam dalam mortar dilakukan sesuai dengan standar ASTM C876-22b. Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 50 mm dan tinggi 100 mm dipersiapkan dengan baja polos berdiameter 10 mm yang ditanam pada posisi sentral. Ujung baja yang terekspos disambungkan dengan kabel tembaga melalui proses penyolderan, kemudian permukaan cetakan ditutup dengan lapisan epoksi untuk mencegah terjadinya korosi prematur (Gambar 3). Pengukuran dilakukan menggunakan elektroda kalomel jenuh (SCE) sebagai elektroda referensi. Nilai potensial diukur setiap 7 hari sekali hingga umur 91 hari, dengan tiga titik pengukuran tetap pada setiap benda uji. Interpretasi hasil HCP didasarkan pada kriteria ASTM C876, di mana nilai potensial yang lebih negatif dari –276 mV menunjukkan probabilitas lebih dari 90% terjadinya korosi aktif pada baja tulangan (Tabel 4).



Gambar 3. Skema dan foto pengaturan pengukuran HCP

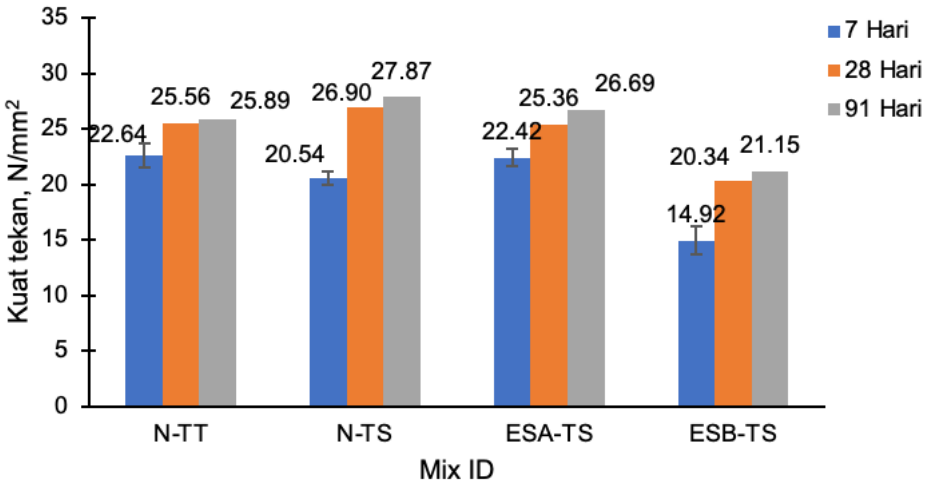
Tabel 4. Kriteria probabilitas korosi berdasarkan nilai HCP (ASTM C876-22b)

Nilai potential		Potensi risiko korosi
$CuSO_4$ (mV vs. CSE)	**Ag/AgCl (mV vs. SCE)**	
E_{corr}>-200	>-125	rendah
-200≤E_{corr}≤-350	-126≤E_{corr}≤-275	menengah
E_{corr}<-350	E_{corr}<-276	tinggi
E_{corr}<-500	E_{corr}<-426	sangat tinggi

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Uji Tekan

Hasil pengujian kuat tekan untuk seluruh variasi campuran pada umur 7, 28, dan 91 hari ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, nilai kuat tekan meningkat seiring dengan bertambahnya umur perawatan untuk semua variasi campuran, yang menunjukkan berlangsungnya proses hidrasi dan kemungkinan aktivitas pozzolanik dari NESP.



Gambar 4. Kuat tekan mortar dengan variasi campuran pada umur 7, 28, dan 91 hari.

Pada umur 7 hari, campuran kontrol N-TT mencapai 22,64 MPa, sedangkan N-TS 20,54 MPa. Campuran dengan substitusi NESP, yaitu ESA-TS (5% NESP) dan ESB-TS (10% NESP), masing-masing mencatat 22,42 MPa dan 14,92 MPa. Nilai ESB-TS menurun 34% dibanding N-TT, menunjukkan adanya efek pengenceran akibat berkurangnya semen aktif serta keterlambatan aktivitas pozzolanik NESP pada umur dini (Hamada et al., 2020; Lothenbach et al., 2011). Hal ini sejalan dengan temuan bahwa material pozzolan berkalsium rendah umumnya belum aktif sepenuhnya pada tahap awal (Patah et al., 2025; Dasar et al., 2025).

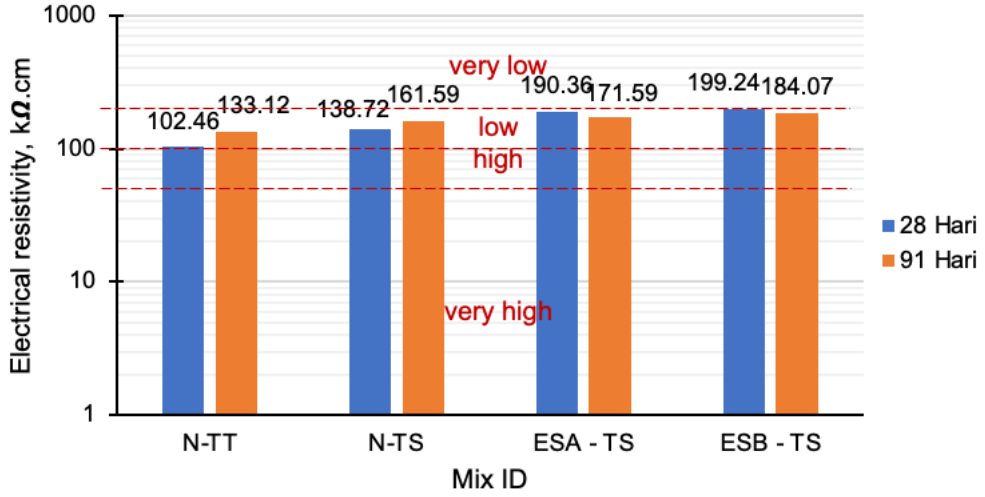
Pada umur 28 hari, semua campuran menunjukkan peningkatan. Kuat tekan N-TT meningkat menjadi 25,56 MPa (+13% dari 7 hari), N-TS menjadi 26,90 MPa (+31%), ESA-TS menjadi 25,36 MPa (+13%), sedangkan ESB-TS hanya naik menjadi 20,34 MPa (+36% dari 7 hari, tetapi tetap 21% lebih rendah dari kontrol). Peningkatan ini mengindikasikan bahwa reaksi pozzolanik dari partikel nano mulai berlangsung lebih signifikan, berkontribusi terhadap pembentukan gel C–S–H tambahan (Paruthi et al., 2023; Sata et al., 2007).

Pada umur 91 hari, tren kenaikan semakin jelas. N-TT mencapai 25,89 MPa dan N-TS 27,87 MPa, masing-masing +14% dan +36% dibanding umur 7 hari. ESA-TS meningkat menjadi 26,69 MPa (+19% dibanding 7 hari), sedangkan ESB-TS mencapai 21,15 MPa (+42% dibanding 7 hari, namun masih 18% lebih rendah dari kontrol). Hasil ini menegaskan bahwa aktivitas pozzolanik NESP semakin dominan pada umur lanjut, meskipun substitusi tinggi (10%) tetap menghasilkan kekuatan absolut yang lebih rendah. Fenomena ini terkait dengan keterbatasan ketersediaan $Ca(OH)_2$ pada kadar penggantian tinggi yang membatasi reaksi lanjutan (Kuzielová et al., 2017; Hamada et al., 2020).

Secara keseluruhan, meskipun penggunaan NESP menurunkan kuat tekan awal, peningkatan kekuatan jangka panjang menegaskan bahwa NESP memiliki sifat pozzolanik efektif. Hal ini didukung oleh laporan terkini bahwa eggshell powder selain kaya CaO juga mengandung sejumlah kecil SiO_2 dan Al_2O_3 dalam bentuk amorf, yang pada ukuran nano dapat bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ menghasilkan gel C–S–H sekunder dan memperbaiki mikrostruktur beton (Paruthi et al., 2023; Hamada et al., 2020; Jhatial et al., 2021). Dengan demikian, penggunaan NESP (terutama pada dosis 5%) berpotensi sebagai strategi ramah lingkungan untuk beton non-struktural maupun elemen ringan di wilayah pesisir dengan media perawatan air laut, sekaligus mendukung pengurangan konsumsi semen dan emisi karbon.

3.2 Uji Electrical Resistivity

Hasil uji electrical resistivity pada umur 28 dan 91 hari ditunjukkan pada Gambar 5. Secara umum, semua variasi campuran menunjukkan nilai resistivitas yang tinggi dengan tren peningkatan seiring umur perawatan. Hal ini menunjukkan bahwa proses hidrasi dan reaksi pozzolanik dari NESP berkontribusi dalam memperbaiki mikrostruktur internal beton, sehingga jalur difusi ion agresif menjadi lebih terbatas (Ariyagoundar et al., 2025; Paruthi et al., 2023; Adamu et al., 2024).



Gambar 5. Electrical resistivity mortar dengan variasi campuran pada umur 28 dan 91 hari.

Pada umur 28 hari, campuran kontrol N-TT dan N-TS masing-masing mencatat resistivitas sebesar 102,46 kΩ·cm dan 138,72 kΩ·cm, keduanya sudah berada pada kategori "sangat rendah probabilitas korosi" (ρ > 100 kΩ·cm). Campuran dengan NESP menunjukkan nilai lebih tinggi, yakni 190,36 kΩ·cm (ESA-TS) dan 199,24 kΩ·cm (ESB-TS), masing-masing +86% dan +95% dibanding N-TT. Hasil ini memperlihatkan bahwa keberadaan partikel nano NESP menyempurnakan struktur pori dan meningkatkan resistivitas beton pada umur menengah.

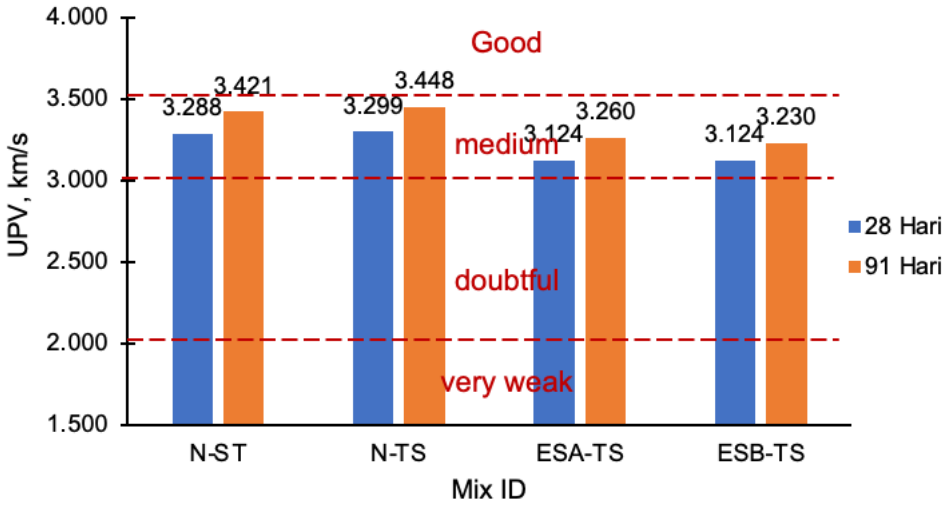
Pada umur 91 hari, campuran kontrol meningkat menjadi 133,12 kΩ·cm (N-TT, +30% dari 28 hari) dan 161,59 kΩ·cm (N-TS, +17%). Campuran dengan NESP menunjukkan 171,59 kΩ·cm (ESA-TS, −10% dari 28 hari) dan 184,07 kΩ·cm (ESB-TS, −8%). Penurunan relatif pada campuran dengan NESP dapat dikaitkan dengan variasi distribusi ion klorida dalam pori beton selama perendaman air laut. Namun, nilai resistivitas seluruhnya tetap jauh di atas 100 kΩ·cm, menandakan probabilitas korosi sangat rendah.

Secara keseluruhan, penggunaan NESP terbukti meningkatkan resistivitas listrik beton dibanding kontrol, terutama pada umur menengah. Peningkatan ini memperkuat dugaan bahwa NESP memiliki sifat pozzolanik efektif, karena selain dominan $CaCO_3$, studi terkini menunjukkan eggshell powder mengandung minor SiO_2 dan Al_2O_3 amorf yang mampu bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ membentuk gel C–S–H sekunder, sehingga memperhalus mikrostruktur dan mengurangi jalur difusi ion klorida (Hamada et al., 2020; Adamu et al., 2024; Paruthi et al., 2023). Dengan demikian, kombinasi NESP dan perawatan air laut berpotensi sebagai solusi beton berkelanjutan di wilayah pesisir tanpa mengorbankan aspek durabilitas.

3.3 *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Hasil pengujian UPV pada umur 28 dan 91 hari ditunjukkan pada Gambar 6. UPV merupakan metode non-destruktif untuk menilai kualitas, homogenitas, serta mendeteksi cacat internal pada beton seperti mikroretak atau rongga. Berdasarkan ASTM C597-16, nilai UPV yang lebih tinggi

mengindikasikan beton yang lebih padat dan seragam, sedangkan nilai lebih rendah mencerminkan porositas lebih besar atau ketidakteraturan mikrostruktur.



Gambar 6. Nilai UPV mortar dengan variasi campuran pada umur 28 dan 91 hari.

Pada umur 28 hari, campuran kontrol N-TT dan N-TS mencatat nilai UPV 3,288 km/s dan 3,299 km/s. Campuran dengan NESP, ESA-TS (5%) dan ESB-TS (10%), masing-masing 3,124 km/s dan 3,124 km/s, atau sekitar −5% dibanding kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa substitusi NESP cenderung sedikit menurunkan densitas dan kemampuan transmisi gelombang ultrasonik pada umur awal. Tren ini konsisten dengan kuat tekan, di mana campuran dengan NESP juga menunjukkan performa lebih rendah pada umur 28 hari. Penurunan tersebut dapat dikaitkan dengan reaktivitas pozzolanik NESP yang belum optimal pada umur dini, serta kemungkinan adanya partikel tidak bereaksi atau pori-pori yang memengaruhi propagasi gelombang ultrasonik (Hamada et al., 2020; Paruthi et al., 2023).

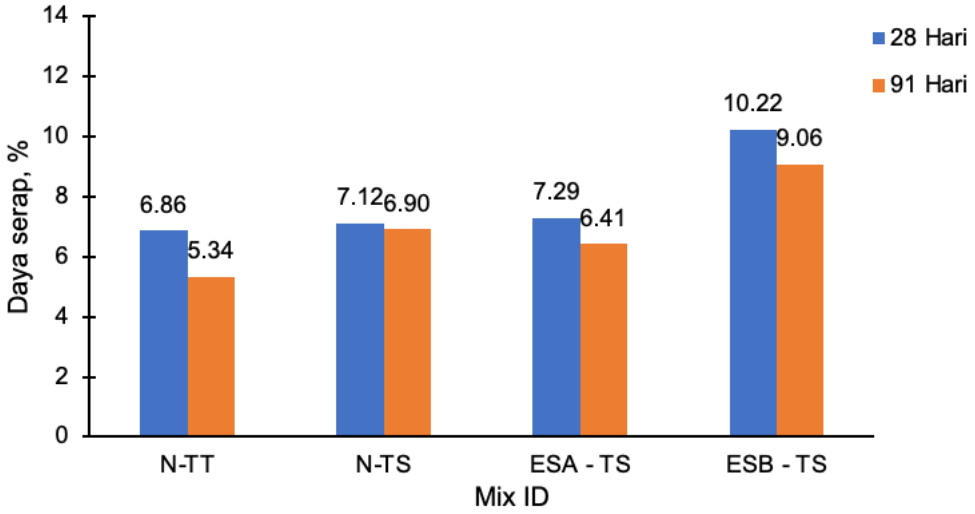
Pada umur 91 hari, seluruh campuran mengalami peningkatan nilai UPV. Campuran N-TT dan N-TS naik menjadi 3,421 km/s (+4% dibanding 28 hari) dan 3,448 km/s (+5%). ESA-TS meningkat menjadi 3,260 km/s (+4% dibanding 28 hari), sedangkan ESB-TS mencapai 3,230 km/s (+3%). Peningkatan ini mencerminkan berlanjutnya hidrasi semen dan reaksi pozzolanik partikel nano NESP, yang menghasilkan pembentukan gel C–S–H sekunder serta penyempurnaan struktur pori. Hal ini juga sejalan dengan kenaikan kuat tekan dan resistivitas listrik pada umur lanjut.

Berdasarkan kriteria ASTM C597, seluruh nilai UPV berada pada kisaran 3,0–3,5 km/s, dikategorikan sebagai beton dengan kualitas baik. Walaupun nilai absolut campuran dengan NESP sedikit lebih rendah dibanding kontrol, perbedaan tersebut tidak signifikan. Hasil ini memperkuat bahwa NESP dapat digunakan hingga 10% tanpa menurunkan kualitas internal beton secara kritis, sekaligus memberikan manfaat lingkungan melalui pengurangan konsumsi semen. Hal ini konsisten dengan penelitian lain bahwa material nano atau ultrafine—termasuk eggshell powder yang mengandung minor SiO_2 dan Al_2O_3 amorf—dapat berperan sebagai pozzolan melalui mekanisme pengisian pori dan nucleation sites, yang mendukung perkembangan mikrostruktur jangka panjang (Dasar et al., 2025; Fode et al., 2023; Adamu et al., 2024).

3.4 Daya serap air

Daya serap air merupakan parameter penting yang menggambarkan tingkat permeabilitas beton, karena berhubungan langsung dengan kemampuan beton menyerap kelembaban dan zat agresif dari lingkungan. Nilai daya serap yang tinggi menandakan adanya struktur pori yang lebih terbuka, yang

dapat mempercepat masuknya ion klorida dan karbon dioksida, sehingga menurunkan durabilitas beton (Kuzielová et al., 2020; Paruthi et al., 2023). Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 7. Secara umum, seluruh campuran mengalami penurunan daya serap dari umur 28 ke 91 hari, menandakan adanya pemadatan matriks akibat hidrasi lanjutan dan aktivitas pozzolanik NESP.



Gambar 7. Daya serap air mortar dengan variasi campuran pada umur 28 dan 91 hari.

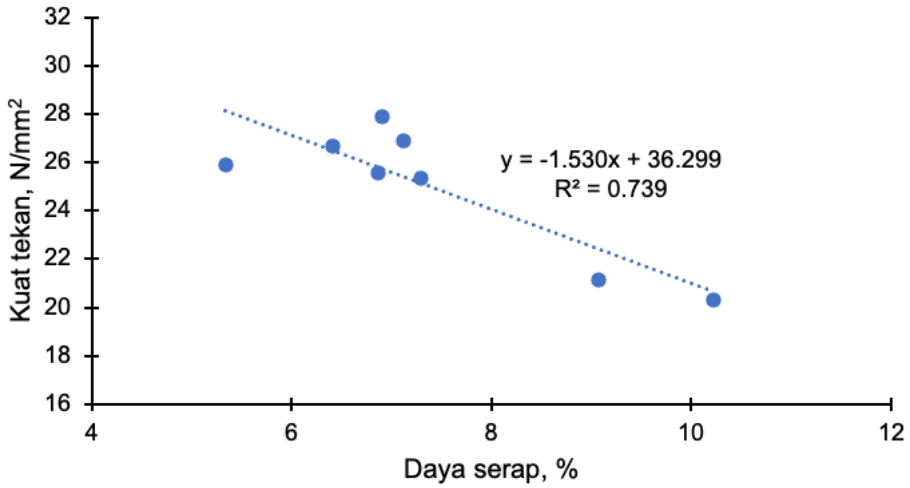
Pada umur 28 hari, campuran kontrol N-TT mencatat daya serap terendah sebesar 6,86%, diikuti N-TS 7,12% dan ESA-TS 7,29%. Sebaliknya, ESB-TS dengan NESP 10% menunjukkan nilai tertinggi 10,22%, yaitu +49% lebih besar dibanding N-TT. Hal ini mencerminkan bahwa substitusi semen dalam jumlah besar meningkatkan porositas awal dan menurunkan ketahanan terhadap penetrasi air.

Pada umur 91 hari, semua campuran menunjukkan penurunan daya serap: N-TT turun menjadi 5,34% (−22% dibanding 28 hari), N-TS menjadi 6,90% (−3%), ESA-TS menjadi 6,41% (−12%), dan ESB-TS menjadi 9,06% (−11%). Penurunan ini mengindikasikan bahwa partikel nano NESP mulai bereaksi lebih aktif pada periode lanjut, menghasilkan gel C–S–H sekunder yang memperbaiki struktur pori (Fode et al., 2023; Hamada et al., 2020). Namun, meskipun menurun, campuran ESB-TS tetap memiliki daya serap tertinggi, mengindikasikan bahwa substitusi 10% NESP masih melemahkan kepadatan mikrostruktur.

Temuan ini memperkuat bahwa NESP memiliki sifat pozzolanik efektif dalam jangka panjang. Sejumlah studi menunjukkan bahwa eggshell powder, selain kaya $CaCO_3$, juga mengandung minor SiO_2 dan Al_2O_3 dalam fase amorf. Pada ukuran nano, senyawa tersebut dapat bereaksi dengan $Ca(OH)_2$ membentuk gel C–S–H sekunder, sehingga menurunkan porositas dan daya serap air beton (Paruthi et al., 2023; Adamu et al., 2024). Dengan demikian, efektivitas NESP sangat bergantung pada dosis substitusi: 5% terbukti memberi keseimbangan terbaik, sedangkan 10% cenderung meningkatkan porositas awal.

Hubungan antara daya serap dan kuat tekan ditunjukkan pada Gambar 8. Terdapat korelasi negatif linear dengan persamaan regresi $y=-1.530x+36.299$ dan nilai determinasi $R^2=0.739$, yang menunjukkan hubungan kuat antara peningkatan daya serap dengan penurunan kuat tekan. Artinya, semakin tinggi daya serap suatu campuran, semakin rendah nilai kuat tekannya. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyebutkan bahwa beton dengan densitas lebih tinggi (porositas lebih rendah) cenderung memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dan durabilitas lebih baik (Sánchez-Mendieta et al., 2024; Van Ho et al., 2023). Dengan demikian, penggunaan NESP berkontribusi pada peningkatan reaktivitas jangka panjang yang mampu menurunkan daya serap pada umur lanjut. Akan tetapi, substitusi dalam jumlah besar (10%) tetap menghasilkan nilai daya serap yang lebih tinggi

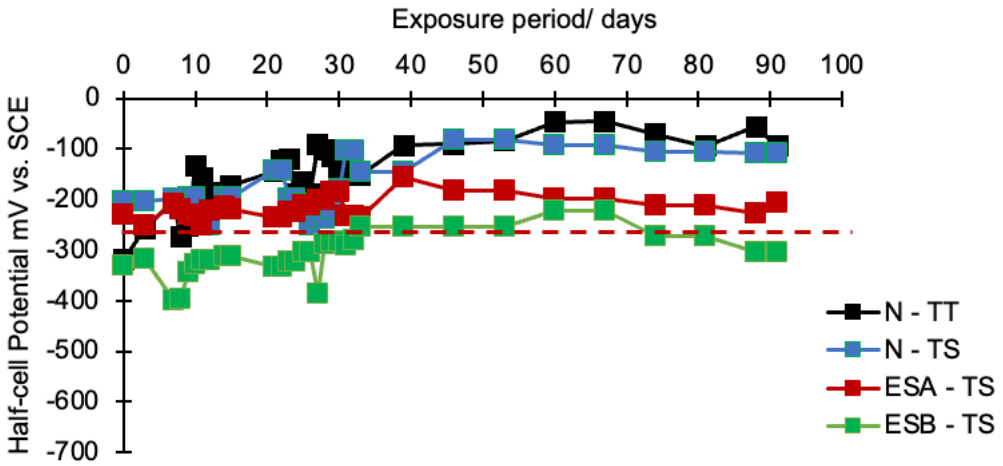
dibandingkan kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas NESP dalam meningkatkan durabilitas sangat bergantung pada proporsi penggunaannya. Kadar optimal perlu dipertimbangkan agar tercapai keseimbangan antara pengurangan penggunaan semen dan peningkatan kualitas mikrostruktur beton.



Gambar 8. Hubungan linear antara daya serap dan kuat tekan mortar.

3.5 *Half-Cell Potential* (HCP)

Pengujian *Half-Cell Potential* (HCP) dilakukan untuk mengevaluasi kecenderungan korosi pada baja tulangan yang terbenam dalam beton dengan menggunakan elektroda kalomel jenuh (SCE), sesuai dengan standar ASTM C876-22b. Hasil pengujian untuk seluruh variasi campuran ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. HCP pada variasi campuran mortar selama periode perendaman hingga 91 hari.

Pada umur awal (0–14 hari), seluruh campuran menunjukkan nilai potensial yang sangat negatif (di bawah −350 mV), yang mengindikasikan probabilitas korosi yang tinggi. Fenomena ini lazim terjadi pada beton bertulang yang baru dicetak, karena lapisan pelindung pasif pada permukaan baja belum terbentuk sepenuhnya akibat masih terbatasnya produk hidrasi semen (Ariyagoundar et al., 2025).

Seiring bertambahnya umur perawatan, nilai potensial bergeser ke arah yang lebih positif, mencerminkan terjadinya pemulihan potensial akibat proses hidrasi lanjutan dan penyempurnaan struktur pori. Campuran kontrol N-TT dan N-TS menunjukkan tren paling stabil, dengan nilai potensial mendekati −100 mV pada umur 91 hari, yang berada jauh di atas batas ambang risiko korosi (−276 mV menurut ASTM C876). Hal ini menandakan bahwa kedua campuran tersebut berada dalam kondisi pasif dengan probabilitas korosi yang sangat rendah. Campuran dengan NESP (ESA-TS dan ESB-TS) menunjukkan perilaku yang berbeda. Campuran ESA-TS cenderung stabil di sekitar −250 mV hingga −300 mV sepanjang periode perendaman, yang berarti berada pada zona ketidakpastian (*uncertain range*), namun masih mendekati kondisi pasif pada umur lanjut. Sebaliknya, ESB-TS dengan kadar NESP lebih tinggi tetap menunjukkan nilai lebih negatif (sekitar −350 mV) hingga akhir pengujian, yang mengindikasikan probabilitas korosi lebih tinggi dibandingkan campuran lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa substitusi semen dengan NESP pada kadar tinggi dapat memperlambat pembentukan lapisan pasif akibat berkurangnya ketersediaan $Ca(OH)_2$ awal yang diperlukan untuk reaksi pozzolanik. Meskipun demikian, tren pergeseran nilai potensial ke arah positif hingga umur 91 hari menegaskan bahwa proses hidrasi dan aktivitas pozzolanik NESP berkontribusi dalam memperbaiki mikrostruktur, mengurangi mobilitas ion agresif, dan membantu pemulihan kondisi pasif pada permukaan baja tulangan. Hasil ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang melibatkan penggunaan material pozzolan seperti *palm oil fuel ash* (POFA) dan *rice husk ash* (RHA), di mana penurunan perlindungan elektrokimia terjadi pada umur awal, tetapi kembali meningkat seiring waktu akibat reaksi pozzolanik yang tertunda (Patah & Dasar, 2023; Dasar et al., 2025). Dengan demikian, meskipun penambahan NESP pada kadar tinggi (10%) dapat meningkatkan risiko korosi pada tahap awal, sistem beton secara keseluruhan tetap mampu mencapai kondisi pasif pada umur lanjut. Hal ini memperlihatkan potensi penggunaan NESP sebagai bahan pengganti semen parsial yang ramah lingkungan, dengan catatan bahwa dosis optimal perlu dipertimbangkan untuk menjaga keseimbangan antara manfaat lingkungan dan performa elektrokimia beton.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menegaskan potensi NESP sebagai material pengganti parsial semen ketika dikombinasikan dengan air laut sebagai media perawatan beton, sebuah pendekatan yang masih jarang diteliti secara simultan. Integrasi hasil pengujian mekanik dan durabilitas menunjukkan bahwa substitusi 5% NESP memberikan keseimbangan paling baik, ditandai dengan peningkatan resistivitas, penurunan daya serap, serta kecenderungan potensial elektrokimia yang stabil, sehingga menghasilkan sistem beton yang lebih padat dan tahan lama. Sebaliknya, penggunaan 10% NESP memperlihatkan keterbatasan berupa penurunan kekuatan awal dan nilai *half-cell potential* yang kurang stabil, meskipun tetap menunjukkan perbaikan mikrostruktur pada umur lanjut. Temuan ini menegaskan kontribusi baru dalam literatur mengenai pemanfaatan limbah kulit telur sebagai bahan pengganti semen yang berkelanjutan, serta relevansi aplikasinya bagi infrastruktur di wilayah pesisir dengan keterbatasan air tawar.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat atas dukungan pendanaan melalui DIPA Fakultas Teknik Tahun Anggaran 2025, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Apresiasi juga diberikan kepada seluruh staf laboratorium yang telah membantu dalam proses pengujian dan penyediaan fasilitas penelitian.

Daftar Pustaka

Hoang, A. T., Huynh, T. T., Nguyen, X. P., Nguyen, T. K. T., & Le, T. H. (2025). An analysis and review on the global NO2 emission during lockdowns in COVID-19 period. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 47(1), 6008-6028.

Waheed, M., Yousaf, M., Shehzad, A., Inam-Ur-Raheem, M., Khan, M. K. I., Khan, M. R., ... & Aadil, R. M. (2020). Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: a comprehensive review. Trends in Food Science & Technology, 106, 78-90.

Abubakar, I. R., Maniruzzaman, K. M., Dano, U. L., AlShihri, F. S., AlShammari, M. S., Ahmed, S. M. S., ... & Alrawaf, T. I. (2022). Environmental sustainability impacts of solid waste management practices in the global South. International journal of environmental research and public health, 19(19), 12717.

Mlitan, A. B. (2023). Cement Dust Pollution and Environment. *Toxicology and Human Health: Environmental Exposures and Biomarkers*, 55-74.

Nematchoua, M. K., Sadeghi, M., & Reiter, S. (2021). Strategies and scenarios to reduce energy consumption and CO2 emission in the urban, rural and sustainable neighbourhoods. Sustainable Cities and Society, 72, 103053.

Yuan, X., Dai, M., Gao, Y., Zhou, Y., & Liu, F. (2023). Effect on mechanical properties and microstructure of high-strength eco-friendly concrete with waste glass powder-eggshell particles. Journal of Building Engineering, 79, 107871.

Fernando, S., Gunasekara, C., Law, D. W., Nasvi, M. C. M., Setunge, S., & Dissanayake, R. (2022). Engineering properties of waste-based alkali activated concrete brick containing low calcium fly ash and rice husk ash: A comparison with traditional Portland cement concrete brick. Journal of Building Engineering, 46, 103810.

Al-Taai, S. H. H. (2022, March). Solid waste: A study of its concept, management methods, and environmental impacts. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1002, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.

Hamada, H.M., Tayeh, B.A., Al-Attar, A., Yahaya, F.M., Muthusamy, K. & Humada, A.M. (2020). The present state of the use of eggshell powder in concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 32, 101583. doi:10.1016/j.jobe.2020.101583.

Kuzielová, E., Žemlička, M., Janča, M., Šiler, P., & Palou, M. T. (2020). Later stages of Portland cement hydration influenced by different portions of silica fume, metakaolin and ground granulated blast-furnace slag. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 142(1), 339-348.

Waheed, M., Yousaf, M., Shehzad, A., Inam-Ur-Raheem, M., Khan, M. K. I., Khan, M. R., ... & Aadil, R. M. (2020). Channelling eggshell waste to valuable and utilizable products: a comprehensive review. Trends in Food Science & Technology, 106, 78-90.

Fode, T. A., Jande, Y. A. C., & Kivevele, T. (2023). Effects of different supplementary cementitious materials on durability and mechanical properties of cement composite–Comprehensive review. Heliyon, 9(7).

Ariyagoundar, J., Mangottiri, V., & Vijayanand, P. S. (2025). A novel embeddable TiO2 potential sensor for corrosion monitoring in concrete structures. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 49(2), 1347-1357.

Budžaki, S., Velić, N., Ostojčić, M., Stjepanović, M., Rajs, B. B., Šereš, Z., ... & Strelec, I. (2022). Waste management in the agri-food industry: The conversion of eggshells, spent coffee grounds, and brown onion skins into carriers for lipase immobilization. Foods, 11(3), 409.

Sánchez-Mendieta, C., Galán-Díaz, J. J., & Martinez-Lage, I. (2024). Relationships between density, porosity, compressive strength and permeability in porous concretes: Optimization of properties through control of the water-cement ratio and aggregate type. *Journal of Building Engineering*, *97*, 110858.

Paruthi, S., Sharma, A., Kumar, P., Raj, R., Bhattacharjee, B. & Kumar, S. (2023). Sustainable cement replacement using waste eggshells: A review on mechanical properties of eggshell concrete and strength prediction using artificial neural network. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02160. doi:10.1016/j.cscm.2023.e02160.

Patah, D. & Dasar, A. (2023). The Impact of using Rice Husks Ash, Seawater and Sea Sand on Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 251–262. doi:10.22146/jcef.6016.

Patah, D., Dasar, A. & Nurdin, A. (2025). Sustainable concrete using seawater, sea-sand, and ultrafine palm oil fuel ash: Mechanical properties and durability. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04129. doi:10.1016/j.cscm.2024.e04129.

Van Ho, Q., & Huynh, T. P. (2023). A comprehensive investigation on the impacts of steel slag aggregate on characteristics of high-performance concrete incorporating industrial by-products. Journal of Building Engineering, 80, 107982.

He, Y., Che, D., Ouyang, X., & Niu, Y. (2022). Surface properties of eggshell powder and its influence on cement hydration. Materials, 15(21), 7633.

Jhatial, A. A., Kumar, A., Bheel, N., Sohu, S., & Goh, W. I. (2022). Assessing the sustainability and cost-effectiveness of concrete incorporating various fineness of eggshell powder as supplementary cementitious material. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(56), 84814-84826.

Patah, D., Dasar, A., & Nurdin, A. Sustainable concrete using seawater, sea-sand, and ultrafine palm oil fuel ash: Mechanical properties and durability. Case Stud Constr Mater. 2025; 22: e04129.

Adamu, M., Alanazi, H., Ibrahim, Y. E., & Abdellatief, M. (2024). Mechanical, microstructural characteristics and sustainability analysis of concrete incorporating date palm ash and eggshell powder as ternary blends cementitious materials. Construction and Building Materials, 411, 134753.

El Naggar, A., Soliman, A., Youssef, M. A., & El Naggar, H. (2025). Novel Methodological Approach to Developing Scaled-Down Concrete Material for Structural Applications: Experimental Validation Using Froude Scaling. Buildings, 15(17), 3234.

Akhtar, M. N., Malkawi, D. A. H., Bani-Hani, K. A., & Malkawi, A. I. H. (2023). Durability assessment of sustainable mortar by incorporating the combination of solid wastes: an experimental study. *Civil Engineering Journal*, *9*(11), 2770-2786.