

Kinerja Mekanik dan Ketahanan Korosi Mortar Menggunakan Pasir Pantai dan Nano Waste Tea Powder

Herni Suryani¹, Sainuddin^{1*}, Nur Okviyani¹, Yusman¹, Apriansyah¹, Amalia Nurdin¹, Akbar Indrawan Saudi¹

¹*Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat

*Email: sainuddin@unsulbar.ac.id

Abstract

Concrete production is one of the major contributors to carbon emissions and the depletion of natural resources, particularly due to the high consumption of cement and natural aggregates. This study aims to evaluate the potential of nano waste tea powder (NWTP), derived from restaurant waste including tea residue, as a partial cement replacement in mortar. The NWTP was processed through washing, drying, oven heating, followed by double grinding using a disc mill to achieve fine particle size. Mortar mixtures were prepared with 5% and 7.5% cement replacement levels using river sand and sea-sand as fine aggregates, and freshwater as mixing water. A total of 184 mortar specimens were tested for compressive strength, porosity, water absorption, sorptivity, and half-cell potential (HCP) up to 91 days of curing. The results showed that mortars containing 5% NWTP maintained good compressive strength and exhibited a gradual reduction in porosity over time. The HCP values of these mixtures remained above the corrosion threshold, indicating stable conditions for the embedded steel reinforcement. In contrast, the use of 7.5% NWTP increased porosity and capillary water absorption, along with HCP values that were more negative than the critical limit, suggesting a higher risk of active corrosion. Mortar containing NWTP combined with river sand showed better performance than those with sea-sand. Overall, the findings indicate that NWTP at a 5% replacement level is optimal for achieving a balance between mechanical performance and durability, making it a promising sustainable alternative material in mortar production based on local waste utilization.

Keywords : Organic waste, partial cement replacement, porosity, half-cell potential, sustainable mortar

Abstrak

Produksi beton menjadi salah satu kontributor utama terhadap emisi karbon dan eksploitasi sumber daya alam, khususnya akibat tingginya penggunaan semen dan agregat alami. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi potensi nano waste tea powder (NWTP), yang berasal dari limbah teh rumah makan, sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam mortar. NWTP diproses melalui pencucian, pengeringan, pengovenan dan dua kali penggilingan menggunakan disc mill untuk mencapai ukuran partikel halus. Campuran mortar disusun dengan penggantian semen sebesar 5% dan 7,5%, menggunakan pasir sungai dan pasir pantai sebagai agregat halus, serta air tawar sebagai media pencampuran. Sebanyak 120 benda uji disiapkan untuk dilakukan pengujian meliputi kuat tekan, porositas, daya serap air, sorptivitas, dan half-cell potential (HCP) hingga umur perawatan 91 hari. Hasil menunjukkan bahwa mortar dengan 5% NWTP mampu mempertahankan kekuatan tekan yang baik dan menurunkan porositas secara bertahap seiring bertambahnya umur. Nilai HCP pada campuran ini juga menunjukkan kondisi baja tulangan yang stabil tanpa indikasi korosi aktif. Sebaliknya, penggunaan 7,5% NWTP menyebabkan peningkatan porositas dan laju penyerapan air yang lebih tinggi, serta nilai HCP yang lebih negatif dari ambang batas korosi, mengindikasikan potensi korosi aktif pada tulangan. Kombinasi NWTP dengan pasir sungai memberikan performa lebih baik dibanding pasir pantai. Secara keseluruhan, NWTP pada kadar 5% dinilai optimal sebagai alternatif bahan tambah ramah lingkungan untuk meningkatkan keberlanjutan dalam produksi mortar berbasis limbah lokal.

Kata kunci: Limbah organik, pengganti sebagian semen, porositas, *half-cell potential*, mortar berkelanjutan

1. Pendahuluan

Pemanasan global akibat meningkatnya suhu rata-rata atmosfer bumi telah menjadi permasalahan serius yang berdampak pada perubahan iklim ekstrem secara global [1]. Salah satu penyebab utama dari fenomena ini adalah emisi karbon dioksida (CO_2) yang bersifat gas rumah kaca dan dapat bertahan lama di atmosfer [2]. Urbanisasi yang pesat, khususnya melalui pembangunan infrastruktur dan bangunan, turut mendorong peningkatan emisi CO_2 karena meningkatnya permintaan terhadap material konstruksi. Sektor konstruksi bahkan menyumbang sekitar 39% dari total emisi CO_2 global setiap tahunnya, dengan 11% di antaranya berasal dari material dan proses konstruksi [3][4].

Di antara material konstruksi, beton merupakan penyumbang karbon terbesar, menyumbang 60% hingga 70% dari total karbon yang terkandung dalam proses konstruksi [5][6]. Hal ini terutama disebabkan oleh proses produksi semen Portland sebagai bahan pengikat utama, yang menghasilkan sekitar 0,9 ton CO_2 untuk setiap 1 ton semen yang diproduksi [7]. Oleh karena itu, penggunaan material alternatif sebagai pengganti sebagian semen menjadi pendekatan strategis dalam menurunkan jejak karbon [8]. Salah satu pendekatan yang banyak diteliti adalah penggunaan bahan pozzolan dari limbah pertanian dan limbah industri, seperti abu sekam padi (RHA), abu ampas tebu (SCBA), abu cangkang sawit (POFA), fly ash (FA) yang telah terbukti meningkatkan kuat tekan dan daya tahan beton [9][10][11][12][13][14][15][16].

Di sisi lain, limbah teh yang berasal dari industri rumah makan dan pabrik pengolahan teh menghasilkan volume limbah padat yang besar setiap tahunnya. Di Indonesia, produksi teh mencapai sekitar 140.000 ton pada tahun 2019, yang menghasilkan limbah padat teh dalam jumlah besar [2]. Sebagian besar limbah ini dibakar dan menyisakan abu teh olahan (waste tea ash), yang umumnya dibuang ke lingkungan terbuka tanpa pengolahan lanjutan, sehingga berisiko menimbulkan masalah

lingkungan dan kesehatan [1]. Padahal, limbah abu teh ini memiliki kandungan silika yang cukup tinggi dan berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam pembuatan beton berkelanjutan.

Hingga saat ini, studi mengenai pemanfaatan limbah teh sebagai bahan tambah semen sebagian besar masih terbatas pada bentuk abu kasar tanpa proses penghalusan lanjutan, sehingga reaktivitas pozzolanika dan penyebaran partikel dalam campuran belum optimal [17][18]. Belum banyak penelitian yang secara khusus mengevaluasi performa abu teh dalam bentuk nano (NWTP) pada sistem mortar yang menggunakan pasir pantai, padahal jenis agregat ini memiliki karakteristik kimia dan fisik yang berbeda secara signifikan dibanding pasir sungai, khususnya dalam hal kandungan garam dan kehalusan partikel yang dapat memengaruhi zona transisi antar muka (ITZ) dan durabilitas jangka panjang beton [19][20]. Selain itu, mayoritas penelitian sebelumnya lebih fokus pada uji mekanik sederhana seperti kuat tekan dan belum secara komprehensif menilai aspek ketahanan korosi baja tulangan menggunakan pendekatan half-cell potential (HCP). Padahal, parameter ini sangat penting dalam menilai kestabilan sistem mortar berbasis limbah jika digunakan pada lingkungan lembap atau agresif [21]. Oleh karena itu, penelitian ini berkontribusi mengisi celah riset tersebut dengan mengevaluasi efek kombinasi NWTP dan pasir pantai terhadap performa mekanik, porositas, sorptivitas, serta ketahanan korosi berdasarkan standar ASTM.

Penelitian ini merupakan bagian dari upaya berkelanjutan untuk mengeksplorasi potensi pemanfaatan limbah lokal sebagai bahan pengikat alternatif dalam pengembangan mortar ramah lingkungan yang memiliki performa baik secara mekanik dan tahan terhadap lingkungan agresif.

2. Metoda Penelitian

2.1. Material

Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Portland Composite Cement* (PCC) Tipe I, sesuai dengan standar

SNI 15-7064-2004. Semen ini dipilih karena ketersediaannya yang luas dan karakteristik mekaniknya yang sesuai untuk beton struktural umum. Berat jenis semen PCC yang digunakan adalah sekitar 3.08.

Bahan pengganti sebagian semen yang digunakan dalam studi ini adalah Nano Waste Tea Powder (NWTP) yang berasal dari limbah teh dari rumah makan lokal. Limbah tersebut terlebih dahulu dibersihkan, kemudian dikeringkan melalui penjemuran dan dioven pada suhu 110 °C selama 48 jam. Setelah kering, limbah ditumbuk hingga halus lalu digiling menggunakan disc mill sebanyak dua kali, dengan saringan No. 100, untuk menghasilkan partikel berukuran nano. Berat jenis dari NWTP ini adalah sekitar 2.789. Penggunaan NWTP bertujuan sebagai material alternatif yang berkelanjutan dalam upaya mengurangi konsumsi semen konvensional. Penampakan NWTP dapat dilihat Gambar 1.



Gambar 1. Penampakan NWTP

Karakteristik kimia dari NWTP yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada hasil-hasil studi terdahulu yang menunjukkan bahwa abu limbah teh umumnya mengandung komponen utama berupa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3), yang secara kumulatif melebihi 70%, sehingga memenuhi syarat sebagai bahan pozzolan berdasarkan standar ASTM C618 [17][18]. Selain itu, kandungan kalsium oksida (CaO), magnesium

oksida (MgO), dan karbon dalam bentuk zat organik sisa pembakaran juga ditemukan dalam jumlah bervariasi tergantung pada sumber dan proses pembakaran. Dalam studi peneliti sebelumnya, hasil uji XRF terhadap abu teh menunjukkan kandungan SiO_2 sebesar 48,2%, Al_2O_3 sebesar 14,3%, dan Fe_2O_3 sebesar 9,8%, yang memperkuat potensi pozzolanika dari material ini [17]. Berdasarkan literatur tersebut, dapat disimpulkan bahwa NWTP memiliki komposisi kimia yang mendukung reaksi pozzolanik, terutama dalam pembentukan gel C-S-H saat bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil hidrasi semen. Penambahan NWTP dalam mortar berpotensi memberikan kontribusi terhadap peningkatan densitas mikrostruktur dan pengurangan porositas, terutama pada dosis optimal.

Dua jenis agregat halus digunakan dalam penelitian ini, yaitu pasir sungai dan pasir pantai. Pasir sungai diperoleh dari Sungai Mappili, sedangkan pasir pantai diambil dari Pantai Pamboang, keduanya berlokasi di Kabupaten Majene, Sulawesi Barat. Kedua jenis pasir ini diolah terlebih dahulu dengan proses pencucian, kemudian digunakan dalam kondisi saturated surface dry (SSD). Ukuran maksimum butiran agregat halus adalah 4.75 mm. Karakteristik fisik dari kedua jenis agregat halus dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Campuran Mortar

Sifat Material	Pasir Sungai	Pasir Pantai
Berat jenis (kondisi SSD)	2.36	2.49
Berat isi (kg/m^3)	1462	1543
Kadar air (%)	3.4	4.5
Daya serap air (%)	1.92	1.94

Air yang digunakan dalam pembuatan campuran beton berasal dari sumur bor yang tersedia di laboratorium Universitas Sulawesi Barat. Air ini dikategorikan sebagai air tawar, dan digunakan untuk seluruh tahap pencampuran dan perawatan (curing) pada penelitian ini. Penggunaan air tawar

memastikan kestabilan hasil pengujian dan meminimalkan potensi reaksi kimia yang tidak diinginkan.

2.2. Desain Campuran dan Pembuatan Benda Uji

Dalam penelitian ini, sebanyak 120 benda uji mortar disiapkan dengan delapan variasi campuran seperti dirinci dalam Tabel 1 dan Tabel 2. Proporsi campuran dirancang berdasarkan penggantian sebagian semen Portland Composite Cement (PCC) dengan Nano Waste Tea Powder (NWTP) sebesar 5% dan 7,5% terhadap berat semen. Campuran mortar menggunakan agregat halus berupa pasir sungai Mappili dan pasir pantai Pamboang, serta air tawar sebagai media pencampur dan perawatan. Rasio air terhadap pengikat (water-to-binder ratio, w/b) dijaga konstan pada 0.4 untuk seluruh campuran, guna memastikan bahwa pengaruh penggunaan NWTP dan jenis pasir dapat diamati secara konsisten tanpa bias dari variasi kadar air.

Tabel 2. Komposisi Campuran dalam 1 m³ Mortar

Kode	Semen (kg)	NWTP 5% (kg)	NWTP 7,5% (kg)	Air (kg)	Pasir Sungai (kg)	Pasir Pantai (kg)
N-FR-T	580	0	0	232	1223	0
A-FR-T	551	29	0	232	1216	0
B-FR-T	536.5	0	43.5	232	1213	0
N-FS-T	580	0	0	232	0	1287
A-FS-T	551	29	0	232	0	1280
B-FS-T	536.5	0	43.5	232	0	1276

Seluruh bahan kering terlebih dahulu ditimbang sesuai komposisi per m³ campuran, lalu dicampur menggunakan mixer beton tipe drum selama 5 menit. Setelah itu, sekitar 50% dari total volume air ditambahkan, dan campuran diaduk kembali selama 3 menit. Sisa air kemudian dimasukkan, diikuti dengan pengadukan tambahan selama 5 menit. Adonan mortar segar selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan dengan dimensi yang sesuai pengujian (50 × 50 × 50 mm untuk uji kuat tekan, sorptivity, porositas, dan daya serap; serta silinder diameter 50 mm tinggi 100 mm untuk uji half-cell potential). Bagian dalam cetakan sebelumnya telah dilapisi minyak agar mudah

dalam proses pembongkaran. Proses pemadatan dilakukan secara bertahap dengan batang besi berdiameter 16 mm, dilanjutkan dengan pemadatan menggunakan meja getar selama 1 menit. Setelah pemadatan, cetakan ditutup dengan plastik film dan didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah 24 jam, benda uji dilepaskan dari cetakan dan kemudian direndam dalam air tawar untuk proses perawatan (curing) selama 7, 28, dan 56 hari, sesuai standar pengujian.

Tabel 3. Jumlah dan Variasi Benda Uji

No	Pengujian	Ukuran Benda Uji	Jumlah Tiap Variasi	Jumlah Variasi	Total
1	Kuat Tekan	50 × 50 × 50 mm	9	6	54
2	Sorptivity	50 × 50 × 50 mm	3	6	18
3	Porositas	50 × 50 × 50 mm	6	6	36
4	HCP	Ø 50 mm × 100 mm	2	6	12
Total					120

2.3. Metode Pengujian

Sifat mekanik dan durabilitas mortar yang telah mengeras dievaluasi melalui beberapa pengujian, yaitu kuat tekan, porositas total, laju penyerapan air (sorptivitas), serta potensial setengah sel (*half-cell potential*, HCP).

2.3.1. Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap benda uji berbentuk kubus dengan dimensi 50 × 50 × 50 mm, sesuai dengan standar ASTM C109/C109M-21. Pengujian dilakukan pada umur 7, 28, dan 56 hari. Beban diberikan secara aksial menggunakan mesin uji tekan TESTMAK C3228 dengan kapasitas maksimum 3000 kN dan laju pembebanan 140 kN/menit. Untuk setiap variasi campuran, digunakan tiga sampel (triplikat), dan nilai rata-rata dicatat sebagai hasil akhir.

2.3.2. Uji Porositas

Pengujian porositas dilakukan pada umur 28 hari dengan mengacu pada standar ASTM C642-21. Tiga sampel mortar kubus (50 × 50 × 50 mm) untuk setiap variasi digunakan. Prosedur pengujian melibatkan perendaman sampel dalam air hingga jenuh, kemudian penimbangan dalam kondisi permukaan kering dan setelah pengeringan dalam oven. Nilai

porositas dan daya serap dihitung berdasarkan perbedaan berat sampel dalam kondisi tersebut.

2.3.3. Uji Sorptivitas

Laju penyerapan air kapiler atau sorptivitas diukur berdasarkan prosedur ASTM C1585-20 pada umur 91 hari. Sampel berbentuk kubus dengan dimensi $50 \times 50 \times 50$ mm terlebih dahulu dikondisikan dalam chamber lingkungan dengan suhu $50 \pm 2^\circ\text{C}$ dan kelembapan relatif $80 \pm 3\%$ selama 3 hari. Setelah itu, sampel disimpan dalam ruang tertutup pada suhu $32 \pm 2^\circ\text{C}$ selama 15 hari. Permukaan sampel kemudian dilapisi epoksi pada seluruh sisi kecuali permukaan atas dan bawah. Setelah pencatatan berat awal, sampel diletakkan di atas penyangga besi dalam wadah berisi air setinggi 1–3 mm. Pengukuran penyerapan dilakukan pada interval waktu tertentu: 0, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300 dan 360 menit sejak kontak pertama dengan air. Besarnya absorpsi kumulatif (I) dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \dots\dots\dots(1)$$

di mana I = absorpsi air (mm), m_t = perubahan massa pada waktu t (gram), a = luas bidang kontak sampel dengan air (mm^2), dan d = densitas air (g/mm^3).

2.3.4. Half-Cell Potential (HCP)

Pengujian HCP dilakukan untuk mengevaluasi potensi korosi baja tulangan, sesuai dengan ASTM C876-15. Sampel berbentuk silinder berukuran diameter 50 mm dan tinggi 100 mm, dengan batang baja berdiameter 10 mm dan panjang 100 mm yang ditanam di tengah, serta memiliki selimut beton sebesar 20 mm.

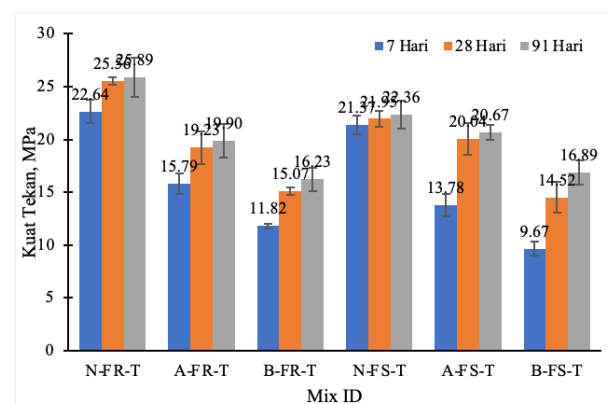
Ujung atas batang baja disambungkan dengan kawat tembaga sebelum proses pengecoran. Setelah perawatan, permukaan atas batang baja dilapisi epoksi untuk mencegah reaksi korosi. Elektroda referensi yang digunakan adalah *Saturated Calomel Electrode* (SCE). Kutub positif voltmeter dihubungkan ke batang baja sebagai elektroda kerja, sedangkan kutub negatif dihubungkan ke elektroda

referensi. Nilai HCP diukur pada tiga titik dan nilai rata-ratanya dicatat sebagai representasi potensi korosi baja. Menurut standar ASTM C876-15, nilai HCP yang lebih kecil dari -256 mV menunjukkan probabilitas lebih dari 90% terjadinya korosi aktif pada tulangan baja.

3. Hasil Penelitian

3.1. Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan mortar pada umur 7, 28, dan 91 hari ditampilkan pada Gambar 2. Secara umum, seluruh variasi campuran menunjukkan peningkatan kekuatan tekan seiring bertambahnya umur perawatan, yang menunjukkan bahwa proses hidrasi berjalan berkelanjutan.



Gambar 2. Kuat tekan mortar pada umur 7, 28, dan 91 hari

Campuran kontrol N-FR-T (100% PCC, pasir sungai) mencatat kuat tekan tertinggi yaitu 25.58 MPa pada 91 hari. Sementara itu, campuran yang mengandung 5% dan 7.5% Nano Waste Tea Powder (NWTP) yaitu A-FR-T dan B-FR-T, masing-masing menunjukkan kuat tekan sebesar 23.90 MPa dan 16.23 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa penggantian sebagian semen dengan NWTP menurunkan kekuatan tekan secara bertahap seiring peningkatan kadar substitusi. Penurunan ini dapat dikaitkan dengan penyerapan air oleh partikel NWTP yang memiliki luas permukaan tinggi dan aktivitas pozzolanika yang masih berkembang pada umur awal, sebagaimana juga dilaporkan oleh Tangchirapat et al. [22] dan Zeyad et al. [23]

Sampel dengan pasir pantai (N-FS-T, A-FS-T, B-FS-T) menunjukkan tren serupa, namun dengan nilai kekuatan tekan yang lebih rendah secara keseluruhan. Pada umur 91 hari, N-FS-T (kontrol pasir pantai) mencapai 22.36 MPa, sementara campuran A-FS-T (NWTP 5%) dan B-FS-T (NWTP 7.5%) masing-masing mencatat 20.67 MPa dan 16.89 MPa. Penurunan kekuatan tekan yang signifikan pada B-FS-T (9.67 MPa di 7 hari menjadi 16.89 MPa di 91 hari) menunjukkan bahwa meskipun terjadi peningkatan selama perawatan, laju pertumbuhan kekuatan tidak secepat campuran lainnya.

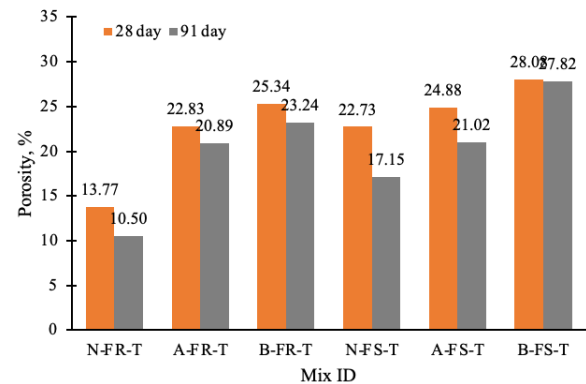
Kehadiran mineral garam dan partikel halus pada pasir pantai dapat memengaruhi kualitas zona transisi antar muka (interfacial transition zone, ITZ), sebagaimana dijelaskan oleh Lothenbach et al.[24]. Meski begitu, perbaikan kekuatan tekan pada umur lanjut tetap terjadi akibat reaksi pozzolanik NWTP yang menghasilkan gel C-S-H tambahan dari interaksi antara SiO_2 dan Ca(OH)_2 [25].

Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan NWTP sebagai pengganti sebagian semen dapat mendukung peningkatan performa beton dalam jangka panjang, namun dosisnya perlu dioptimalkan. Substitusi 5% memberikan hasil yang masih kompetitif dibanding kontrol, sementara dosis 7.5% menurunkan kekuatan tekan secara signifikan pada umur awal hingga menengah.

3.2. Porositas

Hasil pengujian porositas pada umur 28 dan 91 hari ditampilkan pada Gambar 3. Terlihat bahwa porositas menurun seiring bertambahnya umur perawatan untuk semua variasi campuran, yang menunjukkan proses pemadatan mikrostruktur berlangsung secara progresif. Pada umur 28 hari, campuran kontrol N-FR-T menunjukkan nilai porositas paling rendah yaitu 13.77%, dan semakin menurun menjadi 10.50% pada 91 hari. Sementara itu, penggunaan Nano Waste Tea Powder (NWTP) sebesar 5% dan 7.5% dalam campuran A-FR-T dan B-FR-T menyebabkan peningkatan porositas masing-masing menjadi 22.83% dan

25.34% pada 28 hari. Hal serupa juga diamati pada campuran pasir pantai, dengan B-FS-T mencatatkan nilai porositas tertinggi sebesar 28.08% pada 28 hari, dan 27.82% pada 91 hari.

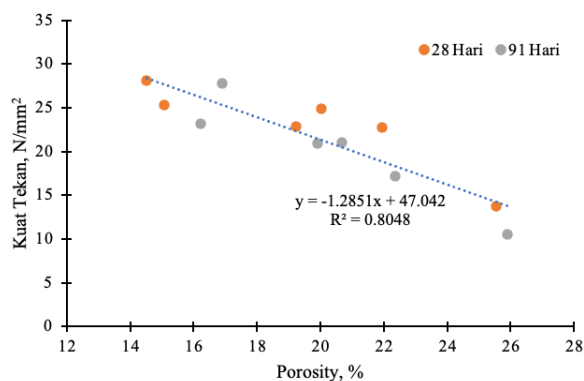


Gambar 3. Porositas mortar pada umur 28 dan 91 hari

Peningkatan porositas pada campuran dengan NWTP dapat dikaitkan dengan karakteristik partikel nano yang menyerap lebih banyak air pada awal hidrasi, sehingga mempengaruhi proses pembentukan gel C-S-H dan kerapatan struktur pori. Fenomena serupa dilaporkan oleh Hamada et al. [25], bahwa substitusi semen dengan bahan pozzolan berukuran lebih besar atau dengan aktivitas pozzolanika yang lebih rendah dapat menyebabkan peningkatan jumlah pori akibat berkurangnya pembentukan Ca(OH)_2 . Di sisi lain, campuran dengan pasir pantai secara umum menunjukkan nilai porositas yang lebih tinggi dibandingkan campuran pasir sungai. Hal ini sejalan dengan temuan Sikora et al. [19], yang menunjukkan bahwa keberadaan kontaminan seperti garam dan mineral laut pada pasir pantai dapat mengganggu proses hidrasi dan membentuk pori-pori tambahan dalam pasta semen. Meskipun penggunaan air tawar dalam studi ini menghindari efek salinitas air laut, sifat fisik pasir pantai sendiri dapat berkontribusi terhadap porositas total campuran.

Hubungan antara nilai porositas dan kuat tekan pada umur 28 dan 91 hari ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, terdapat korelasi negatif yang kuat antara porositas dan kuat tekan, di mana peningkatan porositas diikuti dengan penurunan kekuatan tekan mortar. Dari

grafik terlihat bahwa tren penurunan kuat tekan mengikuti garis regresi linear dengan persamaan: $f_c = -1.2851x + 47.042$ ($R^2 = 0.8048$). di mana f_c adalah kuat tekan (MPa) dan x adalah porositas (%). Nilai koefisien determinasi ($R^2 = 0.8048$) menunjukkan bahwa sebesar 80.48% variasi kuat tekan dapat dijelaskan oleh variasi nilai porositas. Ini mendukung temuan Jin et al. [26] yang menyatakan bahwa distribusi ukuran dan jumlah pori memiliki pengaruh langsung terhadap kapasitas mekanik beton.



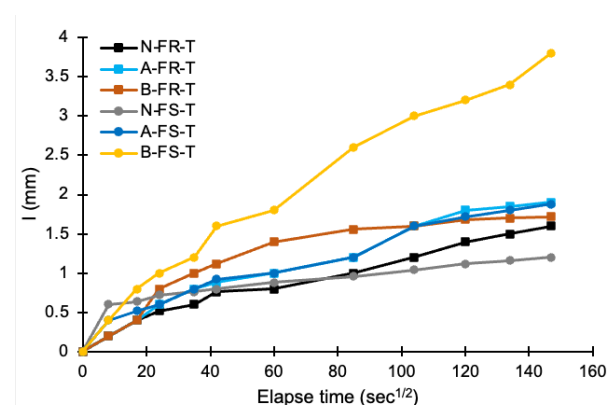
Gambar 4. Hubungan antara kuat tekan dan porositas pada umur 28 dan 91 hari.

Penurunan kuat tekan yang signifikan pada sampel dengan porositas tinggi, seperti B-FS-T dan B-FR-T, menunjukkan bahwa meskipun bahan substitusi seperti NWTP memiliki potensi pozzolanika, penggunaannya dalam dosis yang tinggi (7.5%) dapat memperburuk struktur mikro jika tidak diimbangi dengan kontrol air dan dispersibilitas partikel nano. Semakin besar volume pori, semakin banyak pula ruang kosong dalam struktur pasta semen yang berpotensi menjadi titik lemah terhadap beban mekanik [25]. Sebaliknya, campuran dengan porositas lebih rendah (N-FR-T dan N-FS-T) mempertahankan kuat tekan yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa kompaksi struktur dan densitas internal beton sangat penting dalam menjaga performa mekanik.

3.3. Sorptivitas

Laju penyerapan air kapiler (sorptivitas) merupakan indikator penting untuk mengevaluasi kualitas permukaan dan densitas zona transisi antar muka (interfacial transition

zone, ITZ) dalam mortar. Nilai ini mencerminkan kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori-pori secara kapiler dan sangat berkaitan erat dengan struktur mikro dan tingkat porositas. Pengujian dilakukan berdasarkan standar ASTM C1585-20 pada umur 91 hari. Perkembangan absorpsi kumulatif kapiler (I) terhadap waktu akar kuadrat dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perkembangan absorpsi kumulatif kapiler (I) terhadap waktu akar kuadrat

Dari Gambar 5 terlihat bahwa seluruh sampel mengalami kenaikan tajam dalam absorpsi kumulatif pada tahap awal ($<30 \sqrt{\text{detik}}$), yang kemudian meningkat lebih lambat seiring waktu. Sampel kontrol N-FR-T dan N-FS-T menunjukkan nilai absorpsi terendah dibandingkan dengan campuran lainnya, yang mencerminkan struktur mikro yang lebih rapat dan kualitas ITZ yang baik. Sebaliknya, campuran B-FS-T (NWTP 7.5% + pasir pantai) mencatatkan nilai sorptivitas tertinggi, dengan nilai I mencapai >3.5 mm pada akhir pengamatan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NWTP dalam dosis tinggi dan penggunaan agregat halus dari pasir pantai secara bersamaan dapat meningkatkan kapilerisasi, yang berpotensi mempercepat masuknya ion agresif dan menurunkan durabilitas. Campuran dengan 5% NWTP (A-FR-T dan A-FS-T) menunjukkan kinerja antara kontrol dan campuran 7.5%, yang menunjukkan bahwa pada kadar ini struktur pori masih relatif terkendali. Temuan ini sejalan dengan hasil Islam et al. [27], yang menyatakan bahwa peningkatan kandungan POFA atau

limbah pozzolan lain cenderung meningkatkan daya serap air, karena partikel pozzolan menyerap air pada tahap awal hidrasi dan memiliki struktur berpori lebih banyak dibanding semen Portland biasa.

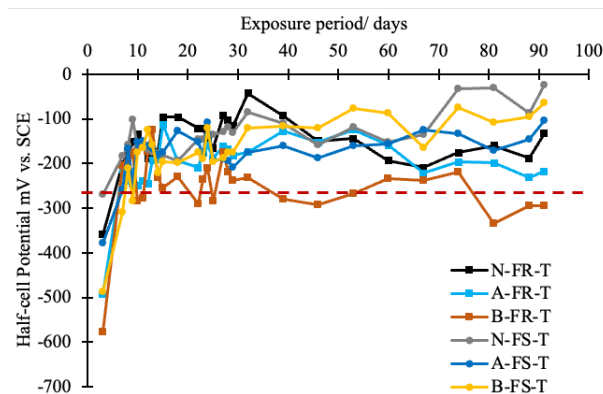
Secara umum, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai absorpsi air, semakin besar risiko terhadap penurunan daya tahan beton, terutama jika digunakan di lingkungan dengan tingkat kelembapan tinggi atau paparan klorida. Oleh karena itu, pengendalian kadar substitusi dan pemilihan agregat yang tepat menjadi faktor penting dalam menjaga durabilitas sistem mortar berbasis limbah.

3.4. Half cell potential

Perubahan nilai potensial setengah sel (HCP) terhadap elektroda referensi *Saturated Calomel Electrode* (SCE) selama masa eksposur hingga 91 hari ditampilkan pada Gambar 6. Sesuai dengan standar ASTM C876-15, nilai HCP yang lebih negatif dari -276 mV menunjukkan adanya potensi tinggi terjadinya korosi aktif pada tulangan baja ($>90\%$), sedangkan nilai yang lebih positif dari batas tersebut mengindikasikan baja berada dalam kondisi aman atau pasif.

Dari hasil pengamatan, campuran kontrol tanpa penggunaan *Nano Waste Tea Powder* (NWTP), yaitu N-FR-T dan N-FS-T, mempertahankan nilai HCP stabil di atas ambang -276 mV selama periode eksposur. Ini menunjukkan bahwa beton tanpa bahan substitusi tetap memberikan perlindungan yang baik terhadap tulangan baja. Sementara itu, campuran yang menggunakan NWTP dalam jumlah 5% (A-FR-T dan A-FS-T) juga menunjukkan respon potensial yang masih berada di sekitar batas aman, walaupun fluktuasi nilainya lebih besar dibanding kontrol. Penurunan signifikan terjadi pada campuran dengan substitusi 7.5% NWTP (B-FR-T dan B-FS-T), yang menunjukkan nilai HCP mencapai hingga sekitar -400 mV pada beberapa titik pengukuran, yang mengindikasikan tingkat korosi aktif telah terjadi. Tingginya nilai negatif pada campuran B-FR-T dan B-FS-T dapat disebabkan oleh

struktur pori yang lebih terbuka dan kurangnya pembentukan gel C-S-H, sehingga air dan oksigen lebih mudah berdifusi menuju permukaan tulangan. Seperti dijelaskan dalam penelitian sebelumnya, meskipun bahan pozzolan seperti NWTP dapat memberikan kontribusi terhadap durabilitas beton, penggunaan dalam proporsi yang terlalu tinggi justru berisiko meningkatkan permeabilitas dan memperburuk perlindungan terhadap baja [21]. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan NWTP hingga 5% masih dapat diterima dalam aspek ketahanan korosi, namun pada 7.5%, terdapat kecenderungan melewati batas keamanan potensial HCP, sehingga perlu dilakukan optimasi lebih lanjut terhadap komposisi dan metode pemrosesan bahan.



Gambar 6. Perubahan nilai half-cell potential selama masa perendaman 91 hari

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *Nano Waste Tea Powder* (NWTP) sebagai bahan pengganti sebagian semen memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan durabilitas mortar. Substitusi semen sebesar 5% NWTP masih mampu mempertahankan kekuatan tekan dan ketahanan korosi baja dalam batas aman, serta menunjukkan penurunan porositas yang konsisten seiring waktu. Sebaliknya, penggunaan NWTP sebesar 7.5% menyebabkan penurunan kekuatan tekan yang lebih tajam, peningkatan porositas, dan nilai *Half-Cell Potential* (HCP) yang lebih negatif, yang mengindikasikan kecenderungan

terjadinya korosi aktif. Dari hasil pengujian sorptivitas, campuran dengan NWTP 7.5% juga menunjukkan laju penyerapan air yang paling tinggi, terutama pada sampel yang menggunakan pasir pantai, yang mengindikasikan struktur pori yang lebih terbuka. Hubungan antara porositas dan kuat tekan menunjukkan korelasi negatif yang kuat, memperkuat bahwa kepadatan mikrostruktur sangat berpengaruh terhadap kekuatan mekanik mortar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan NWTP optimal berada pada kadar 5%, dengan agregat pasir sungai memberikan performa yang lebih baik dibandingkan pasir pantai. Penggunaan NWTP sebagai bahan pengganti semen berpotensi mendukung konsep konstruksi berkelanjutan berbasis limbah organik, namun perlu dikontrol secara cermat untuk memastikan stabilitas struktural dan ketahanan jangka panjang.

5. Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji interaksi kimia dan mikrostruktur NWTP terhadap produk hidrasi semen secara lebih mendalam, serta menguji ketahanan jangka panjang terhadap klorida, karbonasi, dan siklus pembekuan-pencairan. Selain itu, NWTP berpotensi diterapkan pada produk beton pracetak non-struktural seperti paving block, mortar pasangan bata ringan, atau panel dinding prefabrikasi. Uji coba skala kecil pada aplikasi tersebut perlu dilakukan untuk mendukung hilirisasi material ini sebagai inovasi ramah lingkungan yang layak secara teknis dan ekonomis. Sistem pengumpulan dan standarisasi pengolahan limbah teh juga perlu dibangun untuk mendukung implementasi dalam industri konstruksi berkelanjutan.

6. Daftar Pustaka

- [1] K. Humphreys and M. Mahasanen, *Toward a Sustainable Cement Industry: Climate Change. Substudy 8*. World Business Council for Sustainable Development, 2002. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=FvX9tgAACAAJ>
- [2] M. A. Riffat Sb, "Building Energy Consumption and Carbon dioxide Emissions: Threat to Climate Change," *J. Earth Sci. Clim. Change*, vol. s3, 2015, doi: 10.4172/2157-7617.S3-001.
- [3] L. Huang, G. Krigsvoll, F. Johansen, Y. Liu, and X. Zhang, "Carbon emission of global construction sector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1906–1916, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.001.
- [4] K. Ahmed Ali, M. I. Ahmad, and Y. Yusup, "Issues, Impacts, and Mitigations of Carbon Dioxide Emissions in the Building Sector," *Sustainability*, vol. 12, no. 18, p. 7427, Sep. 2020, doi: 10.3390/su12187427.
- [5] R. Kumanayake, H. Luo, and N. Paulusz, "Assessment of material related embodied carbon of an office building in Sri Lanka," *Energy Build.*, vol. 166, pp. 250–257, May 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.065.
- [6] M. Robati, D. Daly, and G. Kokogiannakis, "A method of uncertainty analysis for whole-life embodied carbon emissions (CO₂-e) of building materials of a net-zero energy building in Australia," *J. Clean. Prod.*, vol. 225, pp. 541–553, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.339.
- [7] D. Patah, A. Dasar, and A. Nurdin, "Sustainable concrete using seawater, sea-sand, and ultrafine palm oil fuel ash: Mechanical properties and durability," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04129, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04129.
- [8] P. Chastas, T. Theodosiou, K. J. Kontoleon, and D. Bikas, "Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings," *Build. Environ.*, vol. 130, pp. 212–226, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.12.032.
- [9] A. Siddika, Md. A. A. Mamun, R. Alyousef, and H. Mohammadhosseini,

- “State-of-the-art-review on rice husk ash: A supplementary cementitious material in concrete,” *J. King Saud Univ. - Eng. Sci.*, vol. 33, no. 5, pp. 294–307, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jksues.2020.10.006.
- [10] M. Jahanzaib Khalil, M. Aslam, and S. Ahmad, “Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete – A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 270, p. 121371, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121371.
- [11] H. M. Hamada *et al.*, “Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review,” *J. Build. Eng.*, vol. 40, p. 102286, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102286.
- [12] D. Patah, A. Dasar, I. Ridhayani, H. Suryani, A. I. Saudi, and S. Sainuddin, “Kekuatan dan Durabilitas Oil Palm Shell (OPS) sebagai Alternatif Pengganti Agregat Kasar pada Beton Bertulang,” *JTT J. Teknol. Terpadu*, vol. 12, no. 1, pp. 80–87, Apr. 2024, doi: 10.32487/jtt.v12i1.2103.
- [13] D. Patah, A. Dasar, and N. Md. Noor, “The Effects of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical and Durability Properties of Sustainable Foamed Concrete,” *J. Civ. Eng. Forum*, pp. 75–84, Jan. 2025, doi: 10.22146/jcef.13749.
- [14] D. Patah, A. Dasar, F. Fakhruddin, B. Shintarahayu, and A. Apriansyah, “The Impact of Fly Ash and Sea Sand on Strength and Durability of Concrete,” *Key Eng. Mater.*, vol. 1000, pp. 23–33, Dec. 2024, doi: 10.4028/p-o0WA24.
- [15] A. Dasar, D. Patah, and N. Okviyani, “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,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 481, p. 141539, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.141539.
- [16] A. Dasar, D. Patah, M. A. Caronge, F. Mahmuddin, and A. Apriansyah, “Strength and Durability of Paving Block with Seawater and POFA (Palm Oil Fuel Ash),” *Key Eng. Mater.*, vol. 1000, pp. 11–22, Dec. 2024, doi: 10.4028/p-K6EQUo.
- [17] İ. Bekem Kara and C. Kara, “Tea waste ash: Characterization, pozzolanic activity and effects on the fresh properties of cement pastes,” *Chall. J. Concr. Res. Lett.*, vol. 16, no. 2, p. 51, Jun. 2025, doi: 10.20528/cjcr.2025.02.001.
- [18] N. N. Nasrudin, N. F. Ariffin, A. M. Hasim, and M. N. S. Zaimi, “A Review: Utilization of Waste Materials in Concrete,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 1056, pp. 61–68, Mar. 2022, doi: 10.4028/p-t66fhj.
- [19] P. Sikora, K. Cendrowski, M. Abd Elrahman, S.-Y. Chung, E. Mijowska, and D. Stephan, “The effects of seawater on the hydration, microstructure and strength development of Portland cement pastes incorporating colloidal silica,” *Appl. Nanosci.*, vol. 10, no. 8, pp. 2627–2638, Aug. 2020, doi: 10.1007/s13204-019-00993-8.
- [20] T. P., R. J., L.-G. F., F. F., P. T.H., and T. C., “Effect of siderurgical aggregates on concrete exposed to saline environments,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 352, p. 129061, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129061.
- [21] N. H. A. S. Lim, M. A. Ismail, H. S. Lee, M. W. Hussin, A. R. Mohd. Sam, and M. Samadi, “The effects of high volume nano palm oil fuel ash on microstructure properties and hydration temperature of mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 29–34, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.107.
- [22] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, “Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2641–2646, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008.

- [23] A. M. Zeyad, M. A. Megat Johari, B. A. Tayeh, and M. O. Yusuf, "Efficiency of treated and untreated palm oil fuel ash as a supplementary binder on engineering and fluid transport properties of high-strength concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 1066–1079, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.065.
- [24] B. Lothenbach, D. Nied, E. L'Hôpital, G. Achiedo, and A. Dauzères, "Magnesium and calcium silicate hydrates," *Cem. Concr. Res.*, vol. 77, pp. 60–68, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2015.06.007.
- [25] H. M. Hamada, A. A. Al-attar, F. M. Yahaya, K. Muthusamy, B. A. Tayeh, and A. M. Humada, "Effect of high-volume ultrafine palm oil fuel ash on the engineering and transport properties of concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 12, p. e00318, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2019.e00318.
- [26] S. Jin, J. Zhou, X. Zhao, and L. Sun, "Quantitative relationship between pore size distribution and compressive strength of cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, p. 121727, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121727.
- [27] M. M. Ul Islam, K. H. Mo, U. J. Alengaram, and M. Z. Jumaat, "Durability properties of sustainable concrete containing high volume palm oil waste materials," *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 167–177, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.061.