

Pengaruh Air Laut pada Kualitas Paving Block untuk Aplikasi Non-Struktural

Amry Dasar¹, Dahlia Patah*², Apriansyah³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas
e-mail: ¹amry.dasar@unsulbar.ac.id, ^{2*}dahliapatah@unsulbar.ac.id,
³apriansyah@unsulbar.ac.id

Abstract

The use of freshwater in the construction industry, including paving block production, faces significant challenges due to freshwater resource limitations in many regions. This study aims to evaluate the potential of seawater as an alternative to freshwater in the mixing and curing processes of paving blocks, especially for non-structural applications in coastal areas. The research methodology involves four types of paving block mixtures: AT-AT (mixing and curing with freshwater), AT-AL (mixing with freshwater and curing with seawater), AL-AT (mixing with seawater and curing with freshwater), and AL-AL (mixing and curing with seawater). Tests were conducted on specimens aged 28 and 91 days to evaluate compressive strength, water absorption, porosity, acid resistance, and electrical resistivity. The results indicate that the AT-AT mixture exhibits the highest quality, with the greatest compressive strength, lowest porosity and water absorption, and optimal resistance to acidic environments and corrosion. The AL-AT mixture also demonstrated good performance, with high electrical resistivity and significant porosity reduction, making it suitable for applications in coastal areas. Although the AL-AL mixture showed increased porosity and decreased acid resistance, its resistivity remained adequate for light non-structural applications. These findings suggest that seawater can serve as an economical alternative in the production and curing of paving blocks in areas with freshwater scarcity, without significantly compromising quality for non-structural applications.

Keywords: seawater, paving block, compressive strength, mixing, curing.

Abstrak

Penggunaan air tawar dalam industri konstruksi, termasuk dalam pembuatan paving block, menghadapi tantangan besar akibat keterbatasan sumber daya air tawar di banyak wilayah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penggunaan air laut sebagai alternatif pengganti air tawar dalam proses pencampuran dan perawatan paving block, terutama untuk aplikasi non-struktural di daerah pesisir. Metode penelitian melibatkan empat jenis campuran paving block: AT-AT (pencampuran dan perawatan dengan air tawar), AT-AL (pencampuran dengan air tawar dan perawatan dengan air laut), AL-AT (pencampuran dengan air laut dan perawatan dengan air tawar), dan AL-AL (pencampuran dan perawatan dengan air laut). Pengujian dilakukan pada umur benda uji 28 dan 91 hari untuk mengevaluasi kuat tekan, daya serap air, porositas, ketahanan terhadap larutan asam, dan nilai resistivitas listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran AT-AT pada umur 28 hari memiliki kualitas terbaik dengan kuat tekan tertinggi 18.29 MPa, porositas 8.26%, dan daya serap air terendah 3.60%, serta ketahanan optimal terhadap lingkungan asam dengan kuat tekan 17.30 MPa dan potensi degradasi rendah. Campuran AL-AT juga menunjukkan performa baik dengan electrical resistivity tinggi dan penurunan porositas signifikan, menjadikannya layak untuk aplikasi di wilayah pesisir. Meskipun campuran AL-AL menunjukkan peningkatan porositas dan penurunan ketahanan terhadap asam,

hasil resistivitasnya tetap memadai untuk aplikasi non-struktural ringan. Temuan ini mengindikasikan bahwa air laut dapat digunakan sebagai alternatif yang ekonomis dalam pembuatan dan perawatan paving block di daerah dengan keterbatasan air tawar, tanpa mengorbankan kualitas secara signifikan untuk aplikasi non-struktural.

Kata kunci: air laut; paving block, kuat tekan, pencampuran, perawatan.

1. Pendahuluan

Paving block adalah material konstruksi yang umumnya digunakan pada jalan, driveway, trotoar, garasi, dan area parkir. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-0691-1996 mendefinisikan paving block sebagai material komposit yang terbuat dari semen Portland atau bahan perekat hidraulik sejenis, air, dan agregat. Permintaan paving block yang terus meningkat sebagai bahan konstruksi telah menyebabkan peningkatan kebutuhan semen untuk pembuatannya, selain itu proses pembuatannya juga memerlukan jumlah air tawar yang signifikan. Meskipun tidak sebesar beton, kebutuhan air untuk pencampuran dan perawatan paving block tetap memberikan kontribusi terhadap penggunaan air industri yang cukup besar, terutama di daerah-daerah yang kekurangan air. Beton adalah salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia, namun produksinya membutuhkan jumlah air tawar yang signifikan, yang mencapai sekitar 9% dari total kebutuhan air industri global (Younis dkk, 2018; Bodur dkk, 2023). Konsumsi ini melebihi dua miliar ton air tawar setiap tahunnya (Younis dkk, 2018). Dalam bidang teknik sipil, khususnya di negara-negara maju, muncul kekhawatiran yang semakin besar terkait tantangan di masa depan mengenai berkurangnya ketersediaan sumber daya air tawar untuk digunakan dalam produksi beton (Olutoge & Amusan, 2014). Menurut proyeksi untuk tahun 2050, sekitar 75% dari kebutuhan air untuk produksi beton akan terkonsentrasi di wilayah-wilayah yang diperkirakan akan menghadapi masalah kelangkaan air (Younis dkk, 2018). Mengingat semakin meningkatnya kelangkaan air secara global dan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh proses desalinasi, penggunaan air laut sebagai alternatif yang layak untuk menggantikan air tawar dalam pencampuran beton menjadi solusi yang menjanjikan (Saha dkk, 2024).

Kehadiran unsur-unsur kimia seperti magnesium, sulfat, dan klorida dalam air laut diketahui memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja dan perilaku material berbasis semen (Datta dkk, 2023; Faried dkk, 2021; Tayeh dkk, 2022). Penelitian menunjukkan bahwa air laut dapat mempercepat proses hidrasi semen Portland, yang menyebabkan pengerasan semen lebih cepat dan peningkatan kekuatan awal. Namun, proses hidrasi jangka panjang dan perkembangan kekuatan keseluruhan dari semen Portland yang terpapar air laut masih menjadi topik yang terus didiskusikan dan diteliti (Wang dkk, 2020; Cai dkk, 2021; Wang dkk, 2018).

Peluang dan tantangan yang semakin meningkat terkait dengan penggunaan air laut sebagai air pencampur dalam produksi beton di dunia modern perlu dipertimbangkan. Sebagai sumber air tawar potensial yang mungkin akan semakin terbatas atau mengalami peningkatan permintaan akibat pertumbuhan populasi dan perubahan iklim, air laut menjadi faktor penting yang harus diperhatikan, terutama di wilayah pesisir. Di daerah di mana air tawar langka atau terlalu mahal, air laut menjadi alternatif yang menarik untuk pembuatan beton karena aksesibilitasnya. Namun, penggunaan air laut dalam campuran beton membutuhkan pertimbangan yang cermat karena tingginya kandungan garam dan kemungkinan dampak negatifnya terhadap karakteristik beton (Ellien dkk, 2023).

Mengingat keterbatasan ketersediaan air tawar, penggunaan air laut sebagai pengganti air tawar dalam pencampuran beton menunjukkan potensi manfaat, terutama di daerah pesisir, pulau-pulau, dan wilayah gurun yang menghadapi kelangkaan air (Khatibmasjedi dkk, 2020; patah dkk, 2023a; patah dkk, 2019; patah dkk, 2023b; patah dkk, 2022; Dasar dkk, 2020; Dasar dkk, 2020; Patah dkk,

2022). Pendekatan ini dapat mengurangi biaya konstruksi dan meningkatkan efisiensi kerja (Xiao dkk, 2017; Ghorab dkk, 1990). Air laut mungkin lebih tepat digunakan untuk keperluan non-struktural, seperti proyek infrastruktur di dekat laut, proyek perlindungan pantai, dan konstruksi laut. Selain itu, perkembangan teknologi beton melalui penggunaan bahan tambahan dan material semen khusus dapat memperluas kemungkinan penggunaan air laut dalam campuran beton sambil mengurangi dampak negatifnya (Shabakhty dkk, 2024; Vishwakarma dkk, 2020; Zhao dkk, 2021).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penggunaan air laut sebagai alternatif pengganti air tawar dalam proses pembuatan dan perawatan paving block, dengan latar belakang semakin terbatasnya ketersediaan air tawar dan tingginya kebutuhan air dalam industri konstruksi. Penelitian ini akan mengevaluasi kualitas material paving block yang menggunakan air laut baik dalam pencampuran maupun perawatan, serta menilai dampaknya terhadap sifat mekanis dan fisik paving block, termasuk kekuatan tekan, daya serap, porositas, dan electrical resistivity. Fokus utama penelitian ini adalah memberikan wawasan mengenai potensi penggunaan air laut dalam konstruksi non-struktural, khususnya di wilayah pesisir, pulau terpencil, atau daerah dengan keterbatasan air tawar, sehingga dapat menjadi solusi alternatif yang ekonomis dan berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

2.1 Material

Semen Komposit Portland (PCC) Tipe 1 yang memenuhi standar SNI 15-7064-2004 digunakan sebagai bahan pengikat utama dalam produksi paving block. Semen ini memiliki berat jenis sebesar $3,08 \text{ kg/cm}^3$, yang menunjukkan kualitasnya sebagai material pengikat yang kokoh untuk konstruksi. Sifat-sifat fisika dan kimia dari PCC mencakup berbagai komponen penting yang berperan dalam reaksi hidrasi dan pembentukan kekuatan beton ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisika dan kimia PCC

| Komponen | Simbol Kimia | Kandungan (%) |
|------------------------|--------------------------------|---------------|
| Silikon dioksida | SiO ₂ | 18.39 |
| Aluminium oksida | Al ₂ O ₃ | 5.15 |
| Besi oksida | Fe ₂ O ₃ | 3.14 |
| Kalsium oksida | CaO | 61.79 |
| Sulfur trioksida | SO ₃ | 1.81 |
| Magnesium oksida | MgO | 0.99 |
| Loss on ignition (LOI) | - | 4.61 |

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis air, yaitu air tawar (AT) dari laboratorium dan air laut (AL) yang diperoleh dari Pantai Pengali-ali, Kabupaten Majene, Provinsi Sulawesi Barat, Indonesia (Gambar 1). Selain itu, agregat halus yang digunakan adalah pasir sungai yang disaring menggunakan saringan berukuran 5 mm. Agregat kasar berupa kerikil yang dipakai memiliki ukuran maksimum 20 mm dan bersumber dari Sungai Laliko. Informasi berat jenis semua bahan dalam penelitian ini tercantum pada Tabel 2. Batas klasifikasi untuk pasir dan kerikil mengikuti standar SNI 03-1968-1990. Hasil pengujian karakteristik pasir dan kerikil tersebut disajikan dalam Tabel 3.



Gambar 1. Pengambilan air laut ($3^{\circ}32'44.9''S$, $118^{\circ}57'57.9''E$)

Tabel 2. Berat jenis bahan yang digunakan

| Material | Sifat | Berat Jenis (g/cm^3) | Luas Permukaan Spesifik (m^2/g) |
|---------------|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Semen | PCC Tipe 1 | 3,08 | 382 |
| Agregat Halus | Pasir Sungai, lolos | 2,13 | - |
| Agregat Kasar | Maksimum 20 mm | 2,56 | - |
| Air | Air Tawar (AT) | 1,00 | - |
| | Air Laut (AL) | 1,03 | - |

Tabel 3. Hasil pengujian karakteristik pasir dan kerikil

| Karakteristik | Pasir Sungai | Kerikil |
|--------------------------|--------------|---------|
| Kadar Lumpur (%) | 0,49 | 0,55 |
| Berat Jenis (g/cm^3) | 2,46 | 2,62 |
| Kadar Air (%) | 7,22 | 0,64 |
| Kandungan Organik | No. 2 | No. 2 |
| Daya Serap Air (%) | 1,69 | 0,64 |
| Modulus Kehalusan | 3,39 | 7,82 |

Tabel 4 Karakteristik dan komponen zat air laut

| Ion concentration, mg/L | | | | | | | Specific gravity, gr/m^3 | pH | Salinity |
|-------------------------|-------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|------|-------------------------------|-----|----------|
| K | Na | Ca | Cl ⁻ | SO ₄ | CO ₃ | Mg | | | |
| 243 | 19706 | 226 | 16936 | 1676 | 3486 | 2738 | 1.03 | 7.3 | 30.2 |

2.2 Persiapan Benda Uji

Sebanyak empat batch paving block disiapkan untuk penelitian ini. Dua tipe pencampuran dan perawatan paving digunakan, masing-masing dengan dua jenis air yang berbeda, yaitu air tawar dan air laut. Untuk membedakan jenis pencampuran dan perawatan ini, diberikan simbol-simbol tertentu: pencampuran dan perawatan menggunakan air tawar dilambangkan dengan simbol AT-AT, sedangkan pencampuran air tawar dan perawatan dengan air laut dilambangkan sebagai AT-AL. Di sisi lain, pencampuran air laut dengan perawatan menggunakan air tawar diberi simbol AL-AT, sementara pencampuran dan perawatan yang seluruhnya menggunakan air laut diberi simbol AL-AL. Perbandingan berat antara semen, pasir, dan kerikil dalam campuran ini adalah 1:2:4, dengan perbandingan maksimum air terhadap bahan pengikat sebesar 0,28. Tabel 5 menyajikan proporsi campuran paving block yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 5. Proporsi campuran paving block

| Batch ID | Air | Semen | Pasir | Kerikil | Pencampuran | Perawatan |
|----------|--------|--------|--------|----------|-------------|-----------|
| AT-AT | 115.39 | 412.11 | 824.21 | 1,648.43 | Air tawar | Air tawar |
| AT-AL | 115.39 | 412.11 | 824.21 | 1,648.43 | Air tawar | Air Laut |
| AL-AT | 115.39 | 412.11 | 824.21 | 1,648.43 | Air Laut | Air tawar |
| AL-AL | 115.39 | 412.11 | 824.21 | 1,648.43 | Air Laut | Air Laut |

Langkah-langkah pencampuran paving block adalah sebagai berikut: 1) Semen, pasir, dan abu batu dicampur dalam kondisi kering menggunakan mixer selama 1 menit (lihat Gambar 2a); 2) Air tawar atau air laut kemudian ditambahkan ke dalam campuran, dan pencampuran dilanjutkan selama 2 menit hingga campuran menjadi homogen; 3) Campuran segar dengan sifat zero-slump dimasukkan ke dalam cetakan baja berukuran 200 mm x 100 mm x 70 mm dan dipadatkan menggunakan metode tradisional dengan cara dipukul-pukul hingga paving block terbentuk padat (Gambar 2b); 4) Paving block segar dikeluarkan dari cetakan (Gambar 2c) dan dibiarkan di udara terbuka selama 24 jam sebelum dilakukan perawatan. Perawatan dilakukan dengan menyiram paving block menggunakan air tawar atau air laut dua kali sehari hingga mencapai umur pengujian (Gambar 2d).

**Gambar 2. Proses pembuatan paving block**

2.3 Test Method

2.3.1 Uji tekan

Pengujian kuat tekan paving block dilakukan pada umur 28 dan 91 hari sesuai dengan metode yang tercantum dalam SNI 03-0691-1996, menggunakan mesin uji universal. Beban diterapkan pada permukaan paving block hingga benda ujimengalami kerusakan. Kuat tekan dihitung menggunakan Persamaan 1.

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

dimana,

P = beban maksimum yang menyebabkan kerusakan (N),

A = luas permukaan tempat beban diterapkan (mm²),

σ = kuat tekan (N/mm²).

2.3.2 Daya serap air dan porositas

Daya serap air pada benda uji paving block diukur sesuai dengan SNI 03-0691-1996 pada umur 28 hari. Benda uji paving block terlebih dahulu direndam dalam air selama 24 jam. Setelah itu, permukaan paving block dikeringkan dan beratnya dicatat sebagai berat basah (W_1). Selanjutnya, benda ujidikeringkan dalam oven pada suhu 105°C hingga mencapai berat tetap (W_2). Penyerapan air paving block dihitung dengan Persamaan 2. Untuk pengujian porositas dihitung dengan persamaan 3.

$$WA = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \quad (2)$$

dimana,

- WA = penyerapan air (%),
 W1 = berat basah paving block (kg),
 W2 = berat kering paving block (kg).

2.3.3 Uji Ketahanan Terhadap Asam

Uji ketahanan paving block terhadap asam dilakukan pada umur 28 hari dengan merendam paving block dalam larutan 3% H₂SO₄ selama 28 hari, sesuai SNI 03-0691-1996. Setelah 28 hari perendaman, paving block dikeluarkan, dicuci dengan air bersih, dan dibiarkan dalam kondisi udara terbuka hingga mencapai berat tetap. Setelah itu, kuat tekan paving block diuji kembali menggunakan mesin uji universal.

2.3.4 Electrical resistivity

Pengujian electrical resistivity pada paving block dilakukan untuk mengukur electrical resistivity yang berfungsi sebagai indikator kualitas paving block, terutama terkait ketahanan terhadap penetrasi ion yang dapat menyebabkan degradasi. Metode yang digunakan adalah metode uniaxial, dimana arus listrik dilewatkan secara searah melalui benda uji paving block. Semakin tinggi nilai electrical resistivity pada paving block, semakin rendah risiko terjadinya degradasi akibat penetrasi ion berbahaya seperti klorida, sehingga meningkatkan umur pakai paving block (Tabel 6).

Tabel 6. Interpretasi resistivitas paving block

| Resistivitas (ohm·m) | Interpretasi Kualitas Paving Block | Risiko Degradasi/Korosi |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------|
| < 10 | Kualitas rendah, porositas tinggi | Sangat tinggi |
| 10-50 | Kualitas sedang | Tinggi |
| 50 - 100 | Kualitas baik | Rendah |
| > 100 | Kualitas sangat baik, padat | Sangat rendah |

Langkah-langkah pengujian: 1) Siapkan benda uji paving block dengan ukuran standar, 2) Tempatkan elektroda di kedua ujung paving block untuk mengalirkan arus Listrik, 3) Alirkan arus searah melalui paving block, kemudian ukur tegangan yang dihasilkan, dan 4) Hitung resistivitas menggunakan Persamaan 4.

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (4)$$

dimana,

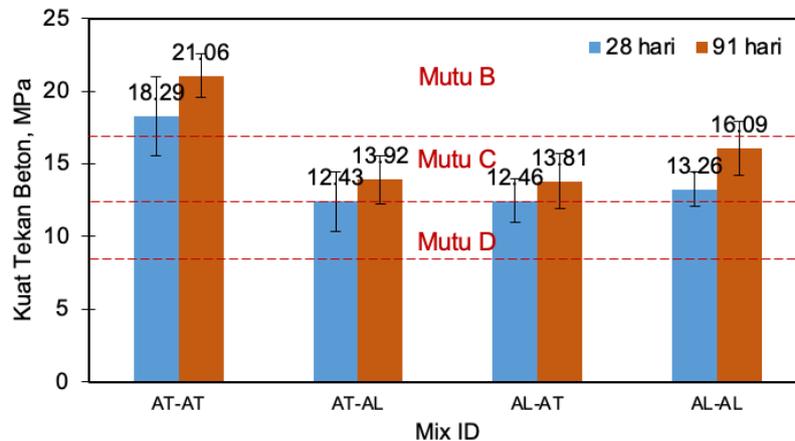
- ρ = Electrical resistivity (ohm·m),
 R = Resistansi yang diukur (ohm),
 A = Luas penampang paving block (m²),
 L = Panjang paving block (m).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan parameter penting yang mempengaruhi daya tahan beton. Hasil pengujian kuat tekan paving block pada umur 28 dan 91 hari dengan variasi penggunaan air tawar dan air laut dalam pencampuran dan perawatan dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3, campuran AT-AT memiliki kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari (18,29 MPa) dan meningkat menjadi 21,06 MPa pada umur 91 hari. Kuat tekan ini melampaui standar SNI untuk paving block Kelas B (17 MPa untuk aplikasi parkir), sehingga cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan tinggi. Hasil ini mendukung penelitian yang menunjukkan bahwa penggunaan air tawar dalam pencampuran dan

perawatan memberikan hasil optimal pada kuat tekan beton karena rendahnya kandungan ion yang dapat mengganggu proses hidrasi semen (Mishra dkk, 2014). Untuk campuran AL-AL memiliki kuat tekan 13,26 MPa pada umur 28 hari dan meningkat menjadi 16,09 MPa pada umur 91 hari. Walaupun tidak memenuhi persyaratan untuk Kelas B, hasil ini sesuai dengan standar Kelas C (12,5 MPa untuk trotoar) dan mendekati standar Kelas B pada umur 91 hari, yang menunjukkan potensi penggunaan air laut dalam paving block untuk aplikasi non-struktural di daerah pesisir atau wilayah dengan keterbatasan air tawar.



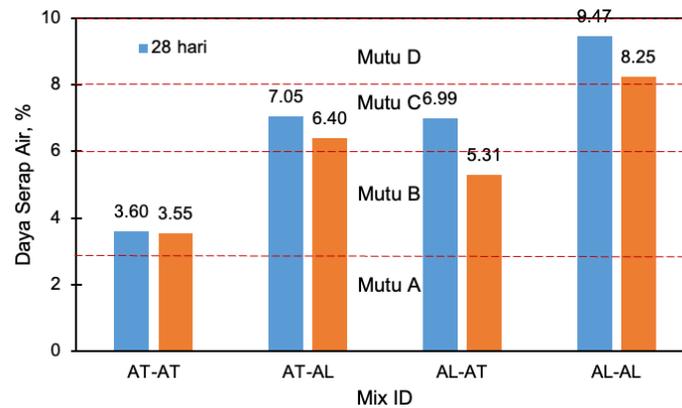
Gambar 3. Kuat tekan beton umur 28 hari dan 91 hari

Setiap campuran mengalami peningkatan kuat tekan antara umur 28 dan 91 hari, yang menunjukkan bahwa waktu curing yang lebih lama memperkuat paving block. Campuran AT-AT mengalami peningkatan sebesar 15,16%, sedangkan campuran AL-AL mengalami peningkatan sebesar 21,34%. Peningkatan signifikan pada campuran AL-AL menunjukkan bahwa ion klorida dalam air laut dapat mempercepat hidrasi semen pada tahap awal dan memperkuat kuat tekan dalam jangka panjang, meskipun mungkin berdampak pada ketahanan jangka panjang jika digunakan pada aplikasi struktural (Neville, 1995; Yang dkk, 2018).

Berdasarkan SNI 03-069-1996, campuran AT-AT memenuhi persyaratan untuk Kelas B pada umur 28 hari, sedangkan campuran AL-AL mendekati standar Kelas B pada umur 91 hari. Campuran AT-AL (12,43 MPa) dan AL-AT (12,46 MPa) pada umur 28 hari hanya memenuhi standar Kelas C (12,5 MPa untuk trotoar), tetapi tidak memenuhi standar untuk aplikasi parkir. Penggunaan air laut pada campuran AL-AL memberikan hasil yang cukup baik untuk paving block non-struktural, seperti untuk trotoar dan area taman, dengan potensi mencapai standar Kelas B (17 MPa) dengan waktu curing yang lebih panjang. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Tang dkk (2019), yang menemukan bahwa air laut dapat dimanfaatkan dalam beton non-struktural dengan pengendalian terhadap dampak jangka panjangnya.

3.2 Daya Serap Air

Hasil daya serap air pada umur 28 hari dan 91 hari disajikan pada Gambar 4. Daya serap air pada paving block sangat dipengaruhi oleh sistem pori dalam material beton yang mengeras, di mana pasta semen berperan sebagai fase kontinu yang menahan air, sedangkan pori-pori pada agregat umumnya tidak saling terhubung dan berkontribusi minim terhadap daya serap air. Berdasarkan Gambar 4, variasi dalam penggunaan air tawar dan air laut dalam proses pencampuran dan perawatan paving block menghasilkan daya serap air yang berbeda-beda pada umur 28 dan 91 hari.



Gambar 4. Daya serap air umur 28 hari dan 91 hari

Campuran AT-AT yang menggunakan air tawar baik dalam pencampuran maupun perawatan menghasilkan daya serap air terendah sebesar 3,60% pada umur 28 hari, yang menurun sedikit menjadi 3,55% pada umur 91 hari, memenuhi persyaratan SNI untuk Kelas B (kurang dari 6%) yang sesuai untuk aplikasi parkir. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan air tawar secara konsisten dalam pencampuran dan perawatan paving block efektif dalam menekan porositas dan menjaga kualitas material. Penurunan daya serap air yang minim dari 28 hari ke 91 hari menunjukkan kualitas pori yang baik dan konsisten, sebagaimana yang juga dijelaskan dalam penelitian Mehta dkk (2015), bahwa air tawar dalam proses curing berperan penting dalam meningkatkan kepadatan material beton dan mengurangi daya serap air.

Di sisi lain, campuran AT-AL yang menggunakan air tawar untuk pencampuran dan air laut untuk perawatan menunjukkan daya serap air sebesar 7,05% pada umur 28 hari, menurun menjadi 6,40% pada umur 91 hari. Ini memenuhi standar untuk Kelas C (kurang dari 8%) yang cocok untuk aplikasi trotoar. Penurunan daya serap sebesar 9,22% menunjukkan bahwa meskipun perawatan menggunakan air laut, kualitas pori dari paving block masih cukup baik untuk aplikasi trotoar dan pejalan kaki, mengindikasikan bahwa air laut sebagai media perawatan dapat digunakan dalam kondisi tertentu.

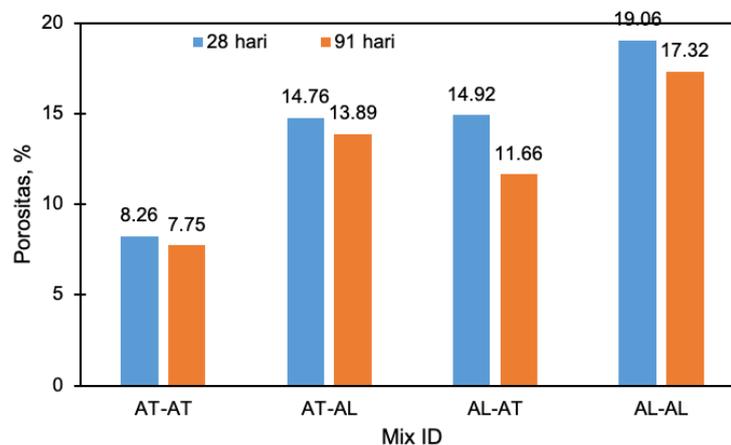
Campuran AL-AT, yang menggunakan air laut untuk pencampuran namun dirawat dengan air tawar, menunjukkan daya serap air sebesar 6,99% pada umur 28 hari dan menurun menjadi 5,31% pada umur 91 hari, sehingga memenuhi standar Kelas B pada umur 91 hari. Penurunan daya serap yang signifikan, yaitu sebesar 24,03%, menunjukkan bahwa perawatan dengan air tawar efektif dalam mengurangi porositas paving block, bahkan ketika pencampuran dilakukan dengan air laut. Hal ini sejalan dengan temuan Neville (1995), yang menyebutkan bahwa perawatan beton dengan air tawar mampu menutup pori dengan lebih baik, meningkatkan kepadatan, dan mengurangi daya serap air.

Namun, campuran AL-AL yang menggunakan air laut baik dalam pencampuran maupun perawatan menunjukkan daya serap air tertinggi, yaitu 9,47% pada umur 28 hari dan menurun menjadi 8,25% pada umur 91 hari. Hasil ini hanya memenuhi syarat untuk Kelas D (kurang dari 10%) yang digunakan untuk aplikasi taman. Penurunan daya serap sebesar 12,89% meskipun terjadi peningkatan kualitas pori seiring waktu, tetap menunjukkan bahwa kombinasi pencampuran dan perawatan dengan air laut menghasilkan paving block dengan porositas lebih tinggi, yang kurang ideal untuk aplikasi yang memerlukan daya serap air rendah. Temuan ini konsisten dengan penelitian oleh Tang dkk (2019), yang menyarankan bahwa air laut dapat digunakan dalam beton non-struktural di wilayah pesisir untuk aplikasi ringan seperti taman, di mana ketahanan terhadap penetrasi air tidak menjadi prioritas utama.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini konsisten dengan literatur yang ada, yang mengindikasikan bahwa air laut dapat digunakan dalam pembuatan beton non-struktural dengan syarat metode curing dan komposisi material diperhitungkan secara tepat. Penggunaan air tawar sebagai media perawatan setelah pencampuran dengan air laut, seperti pada campuran AL-AT, terbukti efektif dalam mengurangi daya serap air dan meningkatkan kualitas pori paving block, yang mendukung temuan dari Neville (1995) dan Tang dkk (2019). Dengan demikian, penggunaan air laut sebagai alternatif dalam pembuatan dan perawatan paving block layak dipertimbangkan di wilayah dengan keterbatasan air tawar, terutama untuk aplikasi non-struktural seperti taman atau trotoar, namun untuk aplikasi dengan persyaratan daya serap yang lebih rendah, penggunaan air tawar tetap lebih dianjurkan.

3.3 Porositas

Hasil porositas benda uji pada umur 28 hari dan 91 hari dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, analisis data porositas paving block pada umur 28 dan 91 hari menunjukkan bahwa setiap variasi campuran menghasilkan perubahan porositas yang signifikan seiring waktu. Campuran AT-AT, yang menggunakan air tawar baik dalam proses pencampuran maupun perawatan, memiliki porositas terendah di antara semua campuran, yaitu 8,26% pada umur 28 hari dan sedikit menurun menjadi 7,75% pada umur 91 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan air tawar dalam pencampuran dan perawatan berperan penting dalam menghasilkan paving block dengan porositas rendah dan kualitas kepadatan yang baik. Hal ini menjadikan AT-AT sebagai kontrol ideal karena memiliki karakteristik material dengan tingkat porositas yang rendah dan stabil.



Gambar 5. Porositas umur 28 hari dan 91 hari

Pada campuran AT-AL, yang menggunakan air tawar untuk pencampuran dan air laut untuk perawatan, porositas mencapai 14,76% pada umur 28 hari dan menurun sedikit menjadi 13,89% pada umur 91 hari. Penurunan ini menunjukkan bahwa meskipun air laut digunakan untuk perawatan, efek penutupan pori tetap terjadi seiring waktu. Namun, dibandingkan dengan AT-AT, campuran AT-AL menunjukkan porositas yang lebih tinggi, mengindikasikan bahwa air laut dalam proses perawatan tidak seefektif air tawar dalam menekan porositas. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang menyebutkan bahwa kandungan ion dalam air laut dapat memengaruhi struktur pori dan meningkatkan porositas dalam jangka panjang (Mehta dkk, 2015).

Campuran AL-AT, yang menggunakan air laut dalam pencampuran dan air tawar untuk perawatan, memiliki porositas 14,92% pada umur 28 hari dan menurun menjadi 11,66% pada umur 91 hari, dengan penurunan sekitar 21,81%. Penurunan yang cukup signifikan ini menunjukkan bahwa perawatan dengan air tawar setelah pencampuran dengan air laut mampu membantu menutup pori-

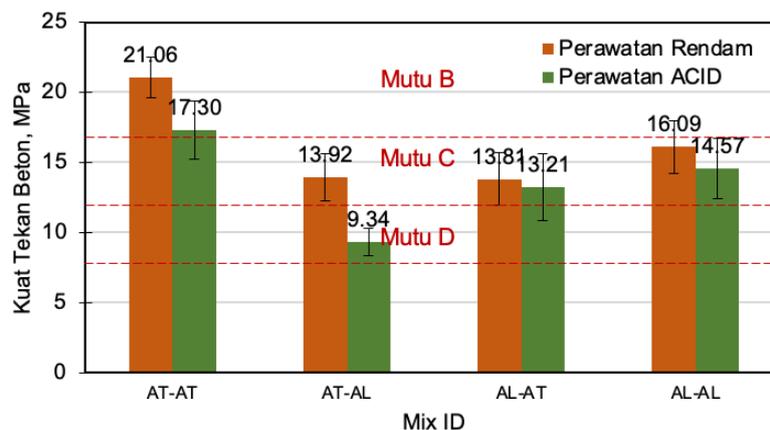
pori secara lebih efektif dibandingkan perawatan dengan air laut. Hal ini mendukung temuan Neville (1995), yang mengindikasikan bahwa perawatan beton dengan air tawar dapat memperbaiki struktur mikro dan mengurangi porositas, bahkan pada beton yang dicampur dengan air laut.

Campuran AL-AL, yang menggunakan air laut baik dalam pencampuran maupun perawatan, memiliki porositas tertinggi, yaitu 19,06% pada umur 28 hari dan menurun menjadi 17,32% pada umur 91 hari. Meskipun ada penurunan sebesar 9,13%, nilai ini tetap menunjukkan tingkat porositas yang tinggi dibandingkan dengan campuran lainnya. Penggunaan air laut sepenuhnya menghasilkan paving block dengan porositas yang lebih tinggi, yang kurang ideal untuk aplikasi yang membutuhkan kepadatan tinggi dan ketahanan terhadap permeabilitas air. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Tang dkk (2019), yang menemukan bahwa penggunaan air laut dalam pencampuran dan perawatan dapat meningkatkan porositas beton, khususnya dalam aplikasi non-struktural di wilayah pesisir.

Secara keseluruhan, AT-AT memiliki porositas terendah, menunjukkan bahwa penggunaan air tawar secara penuh dalam pencampuran dan perawatan paling efektif dalam menghasilkan paving block dengan kualitas kepadatan yang baik. Campuran AL-AT menunjukkan bahwa perawatan dengan air tawar setelah pencampuran dengan air laut dapat menurunkan porositas secara signifikan, mendukung penggunaan air laut di wilayah yang kekurangan air tawar. Sebaliknya, campuran AL-AL dengan air laut dalam pencampuran dan perawatan menunjukkan porositas tertinggi, yang mungkin sesuai untuk aplikasi taman atau area hijau yang tidak memerlukan kepadatan tinggi. Penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi air tawar sebagai media perawatan setelah pencampuran dengan air laut efektif dalam menurunkan porositas, yang konsisten dengan literatur yang ada (Neville, 1995; Tang dkk, 2019).

3.4 Uji Ketahanan Asam

Perbandingan hasil kuat tekan perawatan rendam dengan air biasa dan perawatan dengan larutan asam (acid) pada umur 91 hari ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, analisis data kuat tekan pada paving block menunjukkan perbedaan signifikan antara perawatan rendam dengan air biasa dan perawatan dengan larutan asam (acid). Campuran AT-AT, yang menggunakan air tawar untuk pencampuran dan perawatan, menunjukkan kuat tekan tertinggi dalam kedua metode perawatan. Pada perawatan rendam, AT-AT mencapai kuat tekan 21,06 MPa, sedangkan pada perawatan dengan larutan asam, kuat tekannya menurun menjadi 17,30 MPa. Hal ini menunjukkan penurunan sekitar 17,85% pada perawatan asam. Meski demikian, kedua nilai ini masih memenuhi standar SNI untuk mutu B (minimal 17 MPa), yang menunjukkan bahwa AT-AT memiliki daya tahan yang baik terhadap efek lingkungan asam maupun lingkungan netral.



Gambar 6. Perbandingan Kuat tekan ketahanan acid pada umur 91 hari

Pada campuran AT-AL, yang menggunakan air tawar untuk pencampuran dan air laut untuk perawatan, kuat tekan pada perawatan rendam tercatat 13,92 MPa, sedangkan pada perawatan asam turun signifikan menjadi 9,34 MPa. Penurunan sebesar 32,9% ini menunjukkan bahwa campuran AT-AL lebih rentan terhadap degradasi ketika terpapar kondisi asam, yang mengindikasikan bahwa ion-ion dari air laut dalam proses perawatan dapat mempengaruhi struktur mikro material dan membuatnya lebih rentan terhadap serangan asam. Nilai 13,92 MPa masih memenuhi standar untuk mutu C (12,5 MPa), namun nilai 9,34 MPa pada perawatan asam hanya memenuhi standar mutu D (8,5 MPa), yang sesuai untuk aplikasi ringan seperti taman.

Campuran AL-AT, yang menggunakan air laut dalam pencampuran tetapi dirawat dengan air tawar, memiliki kuat tekan 13,81 MPa pada perawatan rendam dan 13,21 MPa pada perawatan asam. Penurunan sebesar 4,34% ini menunjukkan bahwa perawatan dengan air tawar setelah pencampuran dengan air laut membantu menahan efek negatif lingkungan asam, menghasilkan kuat tekan yang cukup stabil. Hasil ini masih memenuhi standar SNI untuk mutu C, menunjukkan bahwa kombinasi ini memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kondisi asam dibandingkan AT-AL.

Campuran AL-AL, yang menggunakan air laut baik untuk pencampuran maupun perawatan, menunjukkan kuat tekan 16,09 MPa pada perawatan rendam dan turun menjadi 14,57 MPa pada perawatan asam, dengan penurunan sekitar 9,45%. Meski terdapat penurunan, nilai kuat tekan ini masih memenuhi persyaratan mutu C, namun tidak cukup untuk memenuhi standar mutu B pada kedua jenis perawatan. Hal ini mengindikasikan bahwa campuran AL-AL masih cukup baik untuk aplikasi trotoar, tetapi rentan terhadap kondisi asam.

Secara keseluruhan, campuran AT-AT menunjukkan performa terbaik baik dalam kondisi rendam maupun kondisi asam, menunjukkan bahwa penggunaan air tawar secara konsisten dalam pencampuran dan perawatan memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan asam. Perawatan dengan air tawar setelah pencampuran dengan air laut, seperti pada campuran AL-AT, juga menunjukkan hasil yang relatif stabil, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi dengan eksposur lingkungan asam yang rendah. Namun, campuran yang menggunakan air laut baik dalam pencampuran maupun perawatan, seperti AL-AL, lebih rentan terhadap kondisi asam, meskipun masih memenuhi standar mutu C untuk aplikasi trotoar.

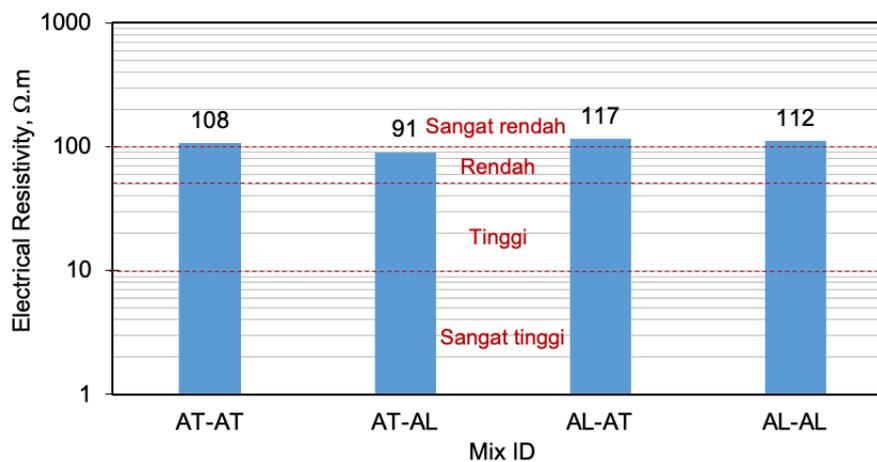
Hasil ini mendukung penelitian oleh Neville (1995) yang menyatakan bahwa air tawar dalam proses perawatan membantu menjaga kepadatan dan kekuatan beton, terutama ketika terpapar lingkungan korosif atau asam. Selain itu, temuan ini juga konsisten dengan penelitian yang menunjukkan bahwa ion-ion dari air laut, seperti klorida, dapat mempercepat reaksi hidrasi awal tetapi berpotensi menurunkan daya tahan jangka panjang beton terhadap lingkungan agresif seperti asam (Tang dkk, 2019).

3.4 Uji Electrical Resistivity

Hasil electrical resistivity umur 28 hari dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7, data electrical resistivity pada paving block sesuai dengan hasil uji kuat tekan dan porositas, menunjukkan konsistensi antara electrical resistivity dengan sifat mekanis dan fisik paving block. Campuran AT-AT, yang menunjukkan resistivitas tinggi sebesar 108 Ω -m dengan kategori "Kualitas sangat baik, padat" dan "Risiko degradasi sangat rendah," juga memiliki kuat tekan tertinggi dan porositas terendah di antara semua campuran. Kuat tekan tinggi dan porositas rendah pada campuran AT-AT menunjukkan bahwa materialnya memiliki struktur yang padat dan sedikit celah untuk penetrasi zat korosif, yang mendukung hasil electrical resistivity yang tinggi dan ketahanan optimal terhadap degradasi.

Campuran AT-AL, yang menggunakan air tawar dalam pencampuran tetapi air laut untuk perawatan, memiliki resistivitas yang lebih rendah ($91 \Omega \cdot m$) dibandingkan AT-AT, yang konsisten dengan hasil kuat tekannya yang lebih rendah dan porositas yang lebih tinggi. Electrical resistivity yang sedikit lebih rendah ini mencerminkan adanya pengaruh negatif dari perawatan dengan air laut, yang mungkin menyebabkan peningkatan porositas dan penurunan kepadatan. Meskipun demikian, hasilnya masih berada pada tingkat "Kualitas baik" dengan risiko degradasi yang rendah, menunjukkan bahwa material ini masih memiliki ketahanan yang memadai terhadap degradasi.

Campuran AL-AT, yang menunjukkan resistivitas tertinggi sebesar $117 \Omega \cdot m$, juga menunjukkan hasil yang baik pada uji kuat tekan dan porositasnya. Hasil ini konsisten dengan peran perawatan air tawar setelah pencampuran dengan air laut, yang mampu menurunkan porositas dan meningkatkan kepadatan material. Kuat tekan yang baik dan resistivitas tinggi pada campuran ini menunjukkan bahwa perawatan air tawar sangat efektif dalam meningkatkan ketahanan material terhadap degradasi dan korosi, bahkan jika pencampuran awal menggunakan air laut.



Gambar 7. Electrical resistivity umur 28 hari

Campuran AL-AL, yang menggunakan air laut baik dalam pencampuran maupun perawatan, memiliki resistivitas yang sedikit lebih rendah dari AT-AT namun masih dalam kategori "Kualitas sangat baik, padat" dengan risiko degradasi sangat rendah. Hasil kuat tekan dan porositas pada campuran ini menunjukkan ketahanan yang cukup baik meskipun sedikit lebih rendah dibandingkan AT-AT. Ini mengindikasikan bahwa meskipun penggunaan air laut sepenuhnya dapat sedikit meningkatkan porositas dan menurunkan kuat tekan, material ini masih memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi, sesuai dengan nilai resistivitasnya.

Secara keseluruhan, data resistivitas listrik, kuat tekan, dan porositas menunjukkan keterkaitan yang erat. Nilai resistivitas yang tinggi pada campuran dengan kuat tekan tinggi dan porositas rendah menunjukkan bahwa paving block yang lebih padat memiliki ketahanan lebih besar terhadap penetrasi ion korosif. Hasil ini mendukung literatur yang ada, seperti yang dijelaskan oleh Neville (1995) dan Adesina dkk. (2024), bahwa material beton dengan struktur padat menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap serangan lingkungan.

Penggunaan air laut sebagai alternatif dalam pembuatan dan perawatan paving block memungkinkan terciptanya material yang memenuhi standar aplikasi non-struktural seperti trotoar dan taman, terutama di wilayah pesisir. Kombinasi air laut dalam pencampuran dengan perawatan air tawar (AL-AT) menghasilkan paving block dengan ketahanan yang cukup baik terhadap korosi, porositas, dan asam, sehingga menjadi solusi alternatif yang layak di area dengan keterbatasan air tawar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan air laut sebagai alternatif dalam proses pencampuran dan perawatan paving block dapat menghasilkan material dengan kualitas yang layak untuk aplikasi non-struktural, seperti trotoar dan taman, terutama di wilayah pesisir yang kekurangan air tawar. Campuran paving block yang menggunakan air tawar dalam pencampuran dan perawatan (AT-AT) memiliki kualitas terbaik, dengan kuat tekan tinggi, porositas rendah, daya serap air minimal, ketahanan terhadap kondisi asam yang baik, dan electrical resistivity tinggi, menunjukkan ketahanan optimal terhadap korosi. Campuran yang menggunakan air laut untuk pencampuran atau perawatan, terutama kombinasi pencampuran air laut dan perawatan air tawar (AL-AT), tetap menunjukkan ketahanan yang memadai terhadap degradasi, dengan hasil resistivitas yang tinggi dan porositas yang lebih baik dibandingkan campuran yang seluruhnya menggunakan air laut. Temuan ini memberikan kontribusi baru dalam teknik sipil dengan menunjukkan bahwa air laut dapat menjadi alternatif yang ekonomis dan berkelanjutan untuk pembuatan dan perawatan paving block di wilayah dengan keterbatasan air tawar, tanpa mengorbankan kualitas secara signifikan untuk aplikasi non-struktural.

Daftar Pustaka

- Adesina, A., & Zhang, J. (2024). Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency. *Next Sustainability*, 100025.
- Bodur, B., Bayraktar, O. Y., Benli, A., Kaplan, G., Tobbala, D. E., & Tayeh, B. (2023). Effect of using wastewater from the ready-mixed concrete plant on the performance of one-part alkali-activated GBFS/FA composites: Fresh, mechanical and durability properties. *Journal of Building Engineering*, 76, 107167.
- Cai, Y., Xuan, D., Hou, P., Shi, J., & Poon, C. S. J. C. (2021). Effects of seawater mixing on water hydration behavior of tricalcium aluminate. *Construction Research*, 149, 106565.
- Cornforth, D. H. 2005. *Landslides in Practice Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., hal. 10 – 15.
- Dasar, A., Patah, D., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2020). Applicability of seawater as a mixing and curing agent in 4-year-old concrete. *Construction and Building Materials*, 259, 119692.
- Dasar, A., Patah, D., Hamada, H., Yamamoto, D., & Sagawa, Y. (2022, December). Life performance of 40-year-old RC beams with different concrete covers and bar diameters in natural corrosion environments. In *Structures* (Vol. 46, pp. 2031-2046). Elsevier.
- Datta, S. D., Sobuz, M. H. R., Sutan, N. M., & Islam, S. (2023). Structural sustainable recycled aggregate concrete production under environmental conditions. *International Journal of Integrated Engineering*, 15(9), 64–71.
- Ellien, A. R., Etman, Z. A., & Nasser, A. A. (2023). Enhancement of concrete mixed or cured with seawater using fly ash and metakaolin. *Engineering Research Journal*, 46(1), 133–142.
- Faried, A. S., Mostafa, S. A., Tayeh, B. A., & Tawfik, T. A. (2021). Mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporated with various nano waste materials under different curing conditions. *Journal of Building Engineering*, 43, 102569.
- Ghorab, H. Y., Hilal, M. S., & Antar, A. (1990). Effect of mixing and curing waters on the behaviour of cement pastes and concrete Part 2: Properties of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*, 20(1), 69–72.
- Khatibmasjedi, M., Ramanathan, S., Suraneni, P., & Nanni, A. J. A. M. J. (2020). Compressive strength development of seawater-mixed concrete subject to different curing regimes. *Advanced Materials Journal*, 117(5).
- Mehta, P. K., dkk (2015). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.

- Mishra, A. dkk (2014). "Influence of Mixing and Curing Conditions on the Compressive Strength of Concrete Made with Seawater." *Construction and Building Materials*.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete*. Longman Group.
- Olutoge, F. A., & Amusan, G. M. J. I. J. E. S. I. (2014). Effect of seawater on compressive strength of concrete. *Construction*, 3(7), 23–31.
- Patah, D., & 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. (2023, September). The Impact of using Rice Husks Ash, Seawater and Sea Sand on Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete. In *Journal of the Civil Engineering Forum* (pp. 251-262).
- Patah, D., Dasar, A., & 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), 109-117.
- Patah, D., Dasar, A., Apriansyah, A., & Caronge, M. A. (2023, July). Strength development of seawater mixed and cured concrete with various replacement ratios of fly ash. In *Materials Science Forum* (Vol. 1091, pp. 111-118). Trans Tech Publications Ltd.
- Saha, A., Tonmoy, T. M., Sobuz, M. H. R., Aditto, F. S., & Mansour, W. (2024). Assessment of mechanical, durability and microstructural performance of sulphate-resisting cement concrete over portland cement in the presence of salinity. *Construction and Building Materials*, 420, 135527.
- Shabakhty, N., Karimi, H. R., & Bakhtiary, A. Y. (2024). Cementitious composites in aquatic environments: Evaluation of fracture and mechanical behavior in long-term submerging in fresh and saltwater, and simulated splash zone conditions. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03035.
- Tang, Y. dkk (2019). "Feasibility of Using Seawater in Non-structural Concrete: Impacts on Compressive Strength and Durability." *Journal of Civil Engineering Research*.
- Tang, Y. dkk (2019). "Feasibility of Using Seawater in Non-structural Concrete: Impacts on Compressive Strength and Durability." *Journal of Civil Engineering Research*.
- Tayeh, B. A., Hamada, H. M., Almeshal, I., & Bakar, B. A. (2022). Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, e01429.
- Vishwakarma, A., Rai, A., & Patel, A. (2020). Effect of salt water on compressive strength, flexural strength and durability of concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7, 106–109.
- Wang, J., Liu, E., & Li, L. J. C. B. (2018). Multiscale investigation of hydration mechanics of seawater OPC paste. *Construction and Building Materials*, 191, 891–903.
- Wang, J., Xie, J., Wang, Y., Liu, Y., & Ding, Y. J. C. (2020). Rheological properties, compressive strength, and hydration products of seawater-mixed cement pastes. *Composites*, 114, 103770
- Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A., & Zhang, K. (2017). Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*, 155, 1101–1111.
- Yang, Y. dkk (2018). "Effects of Seawater and Salt on Concrete: A Comprehensive Review." *Journal of Materials Science Research*.
- Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P., & Nanni, A. (2018). Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 276–286.
- Zhao, Y., Hu, X., Shi, C., Zhang, Z., & Zhu, D. (2021). A review on seawater sea-sand concrete: Mixture proportion, hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 295, 123602.
- パタダリア, 濱田秀則, & 山本大介. (2019). The Effect Of Seawater Mixing On Corrosion Of Steel Bar In 36-Years Old Rc Beams Under Marine Tidal Environment. *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 41(1), 791-796.