

ANALISIS TEMPORAL PERUBAHAN SENYAWA DAN INDIKASI KOROSI AWAL PADA BETON BERTULANG DI LINGKUNGAN AIR LAUT BUATAN MENGGUNAKAN FTIR

Herdi Susanto^{1*}

Farid Jayadi²

Yuza Husran³

Hanif⁴

Mawardi⁵

Zulkifli⁶

Khairul Mizan Us⁷

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

Jl. Alue Peunyareng, Kecamatan Meureubo, Kabupaten Aceh Barat, Provinsi Aceh 23615, INDONESIA

^{4,5,6,7}Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Lhokseumawe

Jl. Banda Aceh - Medan Km. 280 3, Dusun Buketrata, Gampong Mesjid Punteut, Kecamatan Blang Mangat, Kota Lhokseumawe, Provinsi Aceh 24301, INDONESIA

Abstract

Marine environments are highly aggressive to reinforced concrete due to chloride ions that accelerate chemical degradation and initiate reinforcement corrosion, potentially causing early depassivation of steel. This study investigates the temporal evolution of chemical compounds in reinforced concrete and identifies early corrosion-related changes induced by artificial seawater exposure using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Structural-grade reinforced concrete specimens were exposed to artificial seawater with a salinity of approximately 3.5% NaCl under partial immersion conditions, where half of each specimen was immersed while the remaining half was exposed to laboratory air. The exposure period lasted 30 days, with surface concrete powder samples collected at selected intervals. FTIR analysis was conducted to monitor changes in key functional groups, including —OH (Ca(OH)_2), CO_3^{2-} (CaCO_3), calcium silicate hydrate (C—S—H), and free silica. The results indicate progressive carbonation from the early stages of exposure, evidenced by a gradual reduction in —OH intensity and a corresponding increase in carbonate peaks, reflecting a decrease in concrete alkalinity. A notable increase in —OH intensity during the exposure period suggests enhanced moisture absorption, which may facilitate chloride ion diffusion. Although C—S—H phases persisted throughout the test duration, the appearance of free silica at later stages indicates the onset of hydration matrix degradation. These findings demonstrate that progressive carbonation combined with moisture absorption under partial immersion conditions can accelerate early reinforcement depassivation and potentially shorten the service life of reinforced concrete in artificial marine environments.

Keywords:

Reinforced concrete, corrosion, FTIR, carbonation, artificial seawater

Abstrak

Lingkungan laut merupakan salah satu kondisi paling agresif terhadap beton bertulang karena keberadaan ion klorida yang dapat mempercepat degradasi kimia beton serta inisiasi korosi tulangan, sehingga berpotensi menyebabkan depasivasi lapisan pelindung baja tulangan pada tahap awal umur layan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan temporal senyawa kimia beton bertulang dan mengidentifikasi indikasi awal korosi akibat paparan air laut buatan menggunakan metode *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*. Spesimen beton bertulang bermutu struktural dipaparkan pada lingkungan air laut buatan dengan salinitas $\pm 3,5\%$ NaCl, di mana setengah panjang spesimen direndam dalam air laut buatan dan setengah lainnya terpapar udara. Pengamatan dilakukan selama 30 hari dengan pengambilan sampel serbuk permukaan beton pada hari ke-9, 13, 15, 17, 20, 21, 24, 27, dan 30. Analisis FTIR digunakan untuk memantau perubahan intensitas dan keberadaan gugus fungsional utama, meliputi —OH (Ca(OH)_2), CO_3^{2-} (CaCO_3), fase hidrasi silikat (C—S—H), dan silika bebas. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya karbonasi progresif sejak tahap awal paparan, yang ditandai dengan penurunan bertahap intensitas puncak —OH (Ca(OH)_2) dan

Citation in APA Style: Susanto, N., Jayadi, F., Husran, Y., Hanif, Mawardi, Zulkifli, Us, K.M. (2025). Analisis temporal perubahan senyawa dan indikasi korosi awal pada beton bertulang di lingkungan air laut buatan menggunakan FTIR. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 7(2), 272-281.

peningkatan puncak karbonat (CO_3^{2-} , CaCO_3), sehingga mengindikasikan penurunan alkalinitas beton. Lonjakan signifikan intensitas $-\text{OH}$ pada hari ke-17 menunjukkan penyerapan kelembapan yang tinggi, yang berpotensi mempercepat difusi ion klorida ke dalam beton. Fase C–S–H masih terdeteksi sepanjang periode pengujian, namun kemunculan silika bebas pada akhir paparan mengindikasikan awal degradasi matriks hidrasi. Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi karbonasi progresif dan penyerapan kelembapan pada kondisi perendaman parsial dapat mempercepat indikasi depasivasi tulangan dan berpotensi menurunkan umur layan beton bertulang di lingkungan laut buatan.

Kata Kunci:

Beton bertulang, korosi, FTIR, karbonasi, air laut buatan

DOI: [10.38038/vocatech.v%vi%i.252](https://doi.org/10.38038/vocatech.v%vi%i.252)

Received: 18 September 2025; Accepted: 23 Oktober 2025; Published: 24 Desember 2025

*Corresponding author:

Herdi Susanto, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar
Jl. Alue Peunyareng, Kecamatan Meureubo, Kabupaten Aceh Barat, Provinsi Aceh 23615, INDONESIA
Email: herdisusanto@utu.ac.id

1. PENDAHULUAN

Salah satu faktor utama yang menyebabkan penurunan umur layan struktur maritim seperti dermaga, pelabuhan, dan jembatan laut adalah korosi pada beton bertulang di lingkungan laut ; (Susanto et al., 2016, 2018, 2019). Proses degradasi ini terutama disebabkan oleh penetrasi ion klorida (Susanto et al., 2015) dari air laut ;(Fonna et al., 2018) dan proses karbonasi, yang mengurangi alkalinitas beton, menyebabkan lapisan pasif pada permukaan baja tulangan mengalami depasivasi dan menyebabkan korosi ;(Bertolini et al., 2013; Poursae & Angst, 2023).

Ketika kalsium hidroksida $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ dalam pasta semen bereaksi dengan karbon dioksida (CO_2) dari udara, terjadi proses karbonasi, yang menghasilkan CaCO_3 . Ion klorida yang berdifusi melalui pori beton dapat langsung menembus lapisan pasif baja meskipun pH tetap tinggi, mempercepat korosi. Akibatnya, pH beton menurun dari kisaran 12,5 hingga 13 dan akhirnya menjadi di bawah pH 9, yang merupakan batas kestabilan lapisan pasif baja (Angst et al., 2009). Untuk mempercepat proses pengujian korosi, lingkungan laut buatan atau simulasi laboratorium sering digunakan karena dapat mengontrol faktor-faktor seperti salinitas, suhu, dan kelembapan (Xie et al., 2006), dengan menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), analisis perubahan kimia dan identifikasi perubahan senyawa yang menyebabkan korosi pada beton bertulang dapat dilakukan (Feng et al., 2023), serta menunjukkan bahwa penurunan alkalinitas beton dapat meminimalkan kerusakan akibat air laut. Ini memiliki kemampuan untuk mendeteksi perubahan gugus fungsional dan menemukan pembentukan atau degradasi senyawa seperti $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , dan C–S–H (dos Santos et al., 2021; Qu et al., 2023; Sukhairi et al., 2023)

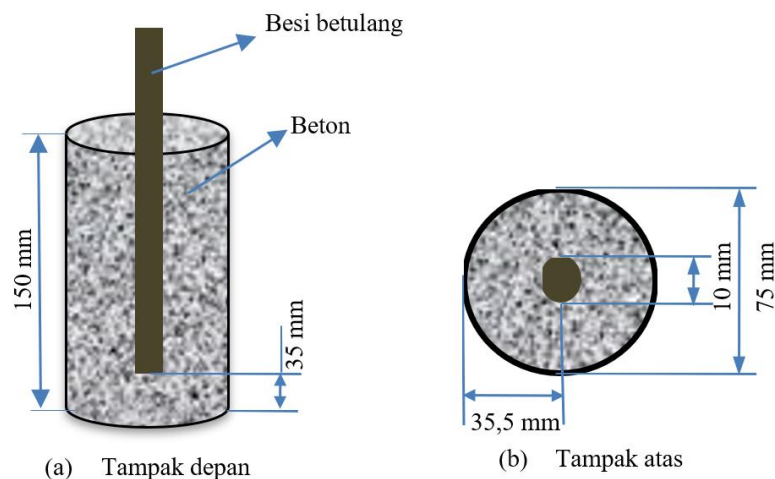
Meskipun berbagai penelitian telah membahas mekanisme korosi beton bertulang di lingkungan laut, sebagian besar studi masih berfokus pada pengujian makroskopik dan parameter tunggal, seperti penetrasi ion klorida, resistivitas listrik, atau potensial korosi, tanpa mengaitkannya secara langsung dengan perubahan kimia beton pada tahap awal paparan. Di sisi lain, studi yang menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) umumnya menitikberatkan pada identifikasi senyawa hidrasi atau karbonasi pada kondisi perendaman penuh atau paparan jangka panjang, sehingga dinamika perubahan senyawa kimia pada kondisi paparan parsial dalam periode awal masih belum banyak dikaji.

Selain itu, keterkaitan temporal antara karbonasi progresif, penyerapan kelembapan, dan potensi percepatan difusi ion klorida pada beton bertulang yang mengalami perendaman parsial—di mana sebagian specimen terendam air laut dan sebagian lainnya terpapar udara—masih belum dipahami secara komprehensif. Padahal, kondisi ini lebih representatif terhadap situasi lapangan pada banyak struktur maritim. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mampu menghubungkan perubahan senyawa kimia beton secara temporal dengan indikasi awal korosi tulangan berbasis analisis FTIR dalam kondisi paparan air laut buatan yang terkontrol.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Bahan dan Spesimen

Spesimen beton bertulang dibuat menggunakan semen Portland tipe I, agregat halus, agregat kasar, dan tulangan baja berdiameter standar. Rasio campuran disesuaikan dengan standar beton struktural menurut SNI 03-2834-2000 (Foulhuda et al., 2022), dengan water-to-cement ratio (w/c) yang merepresentasikan kondisi beton mutu menengah. Selimut beton dibuat sesuai ketentuan minimum SNI 2847:2019 untuk lingkungan laut. Campuran beton bertulang untuk spesimen adalah air 10,65%, semen 28,04%, coarse agregat 36,77%, fine agregat 24,51%, dikeringkan selama 7 hari di udara laboratorium perkiraan kuat tekan f_c 25 Mpa (Rafi & Nasir, 2016; Tanjung, 2022; White, 2023). Bentuk dan dimesi dari spesimen pengujian seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Tampak depan dan (b) tampak atas dimensi spesimen uji

2.2. Lingkungan Paparan

Pengujian dilakukan dengan air laut buatan yang memiliki salinitas $\pm 3,5\%$ NaCl, menyerupai kondisi air laut alami (ASTM D1141-98). Spesimen diletakkan di atas permukaan air laut buatan sehingga terpapar uap garam dan kelembapan tinggi tanpa perendaman langsung (Broomfield, 2023) di mana setengah panjang spesimen direndam dalam air laut buatan dan setengah lainnya terpapar udara laboratorium.

2.3. Durasi dan Interval Pengamatan

Pengamatan dilakukan pada hari ke-9, 13, 15, 17, 20, 21, 24, 27, dan 30. Pada setiap interval, serbuk beton diambil dari lapisan permukaan hingga kedalaman ± 2 mm menggunakan bor mini, sesuai metode pengambilan sampel permukaan beton (Qu et al., 2023).

2.4. Analisis FTIR

Pengujian dilakukan dengan pendekatan replikasi menggunakan tiga spesimen beton bertulang yang identik untuk setiap kondisi pengujian. Ketiga spesimen dibuat dari campuran beton yang sama, diperlakukan dengan prosedur curing yang seragam, dan dipaparkan pada kondisi lingkungan air laut buatan yang identik. Replikasi ini bertujuan untuk meminimalkan pengaruh variasi material dan ketidakpastian eksperimental, serta memastikan keterulangan hasil pengujian. Pada setiap interval waktu pengamatan (hari ke-9, 13, 15, 17, 20, 21, 24, 27, dan 30), sampel serbuk beton diambil dari masing-masing spesimen pada area permukaan yang sama hingga kedalaman sekitar ± 2 mm menggunakan bor mini berkecepatan rendah untuk menghindari perubahan termal atau mekanis pada material. Serbuk beton dari setiap spesimen kemudian dikeringkan pada suhu 50°C selama 24 jam untuk menghilangkan kelembapan bebas sebelum dilakukan analisis FTIR.

Analisis FTIR dilakukan menggunakan spektrometer FTIR pada rentang bilangan gelombang 4000–400 cm^{-1} dengan resolusi 4 cm^{-1} . Setiap sampel dianalisis dengan jumlah pemindaian (scan) yang sama untuk menjamin konsistensi spektrum yang diperoleh. Spektrum FTIR dari tiga spesimen pada interval waktu yang sama dibandingkan untuk mengevaluasi keseragaman pola serapan, kemudian dianalisis secara kualitatif berdasarkan kemunculan, intensitas relatif, dan pergeseran puncak gugus fungsional utama. Data FTIR yang disajikan merupakan hasil representatif dari tren yang konsisten pada ketiga spesimen, dengan fokus pada perubahan gugus $-\text{OH}$ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), CO_3^{2-} (CaCO_3), fase hidrasi silikat ($\text{C}-\text{S}-\text{H}$), dan kemunculan silika bebas. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi perubahan senyawa kimia beton secara temporal yang

dapat dikaitkan dengan proses karbonasi, penyerapan kelembapan, dan indikasi awal degradasi matriks beton akibat paparan air laut buatan) (dos Santos et al., 2021; Jagodang Harahap, 2022)

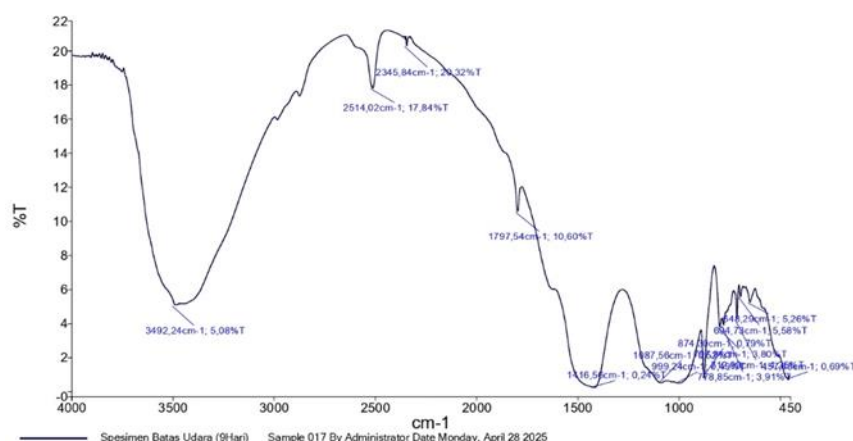
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesimen yang telah dibuat, direndam dalam larutan air laut buatan dalam sebuah wadah seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pengambilan sampel data dilakukan sesuai dengan waktu yang telah ditentukan, mengikuti prosedur penelitian dalam metode penelitian.



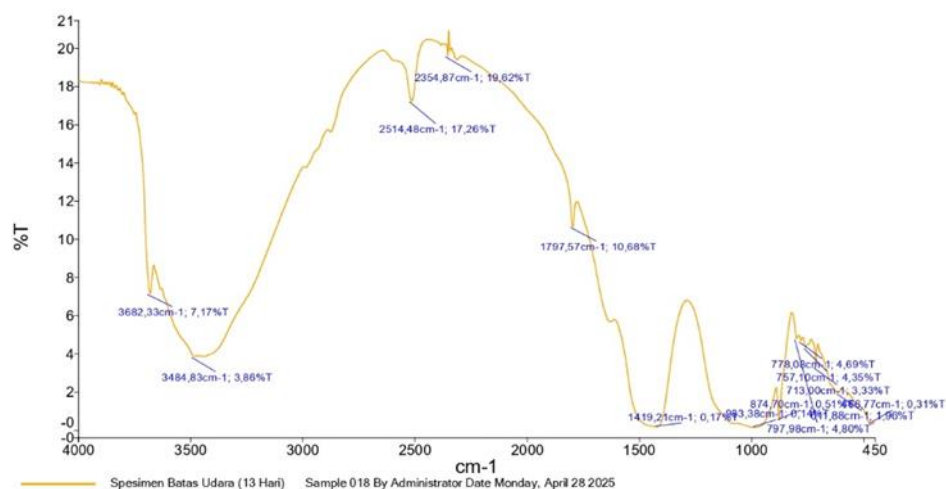
Gambar 2. Perendaman spesimen pada wadah yang berisi air laut buatan

Data dianalisis untuk menentukan tren perubahan komposisi senyawa selama paparan, yang kemudian dikaitkan dengan mekanisme karbonasi, penyerapan kelembapan, dan potensi penetrasi ion klorida berdasarkan literatur korosi beton ;(Bertolini et al., 2013; Poursaei & Angst, 2023). Hasil pengujian FTIR perendaman selama 9 hari, ditunjukkan pada Gambar 3.



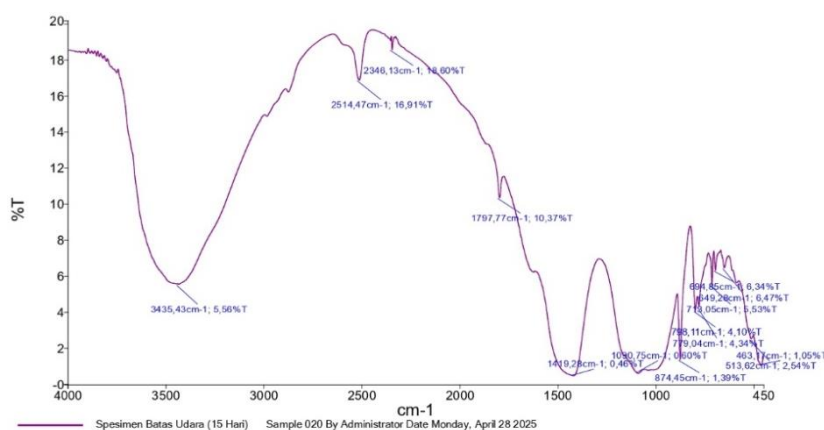
Gambar 3. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 9 hari perendaman

Spektrum FTIR pada 9 hari menunjukkan puncak serapan yang signifikan pada 2345.84 cm^{-1} (20.32%T) dan 2514.02 cm^{-1} (17.84%T), yang kemungkinan besar terkait dengan vibrasi regangan C-H dari gugus alkana atau alifatik. Puncak pada 1797.54 cm^{-1} (10.60%T) dapat mengindikasikan keberadaan gugus karbonil (C=O), menunjukkan kemungkinan awal oksidasi atau pembentukan ester/keton. Serapan pada 3492.24 cm^{-1} (5.08%T) mengindikasikan adanya gugus hidroksil (O-H), yang bisa berasal dari air atau alkohol. Puncak-puncak di daerah sidik jari seperti 1416.56 cm^{-1} (0.24%T), 1087.56 cm^{-1} (0.52%T), 999.24 cm^{-1} (0.49%T), 874.30 cm^{-1} (0.79%T), 797.81 cm^{-1} (3.80%T), 778.85 cm^{-1} (3.91%T), 712.99 cm^{-1} (4.25%T), 694.73 cm^{-1} (5.58%T), 648.29 cm^{-1} (5.26%T), dan 457.68 cm^{-1} (0.69%T) menunjukkan keberadaan berbagai ikatan C-C, C-O, dan C-H bending yang spesifik untuk struktur molekuler awal.



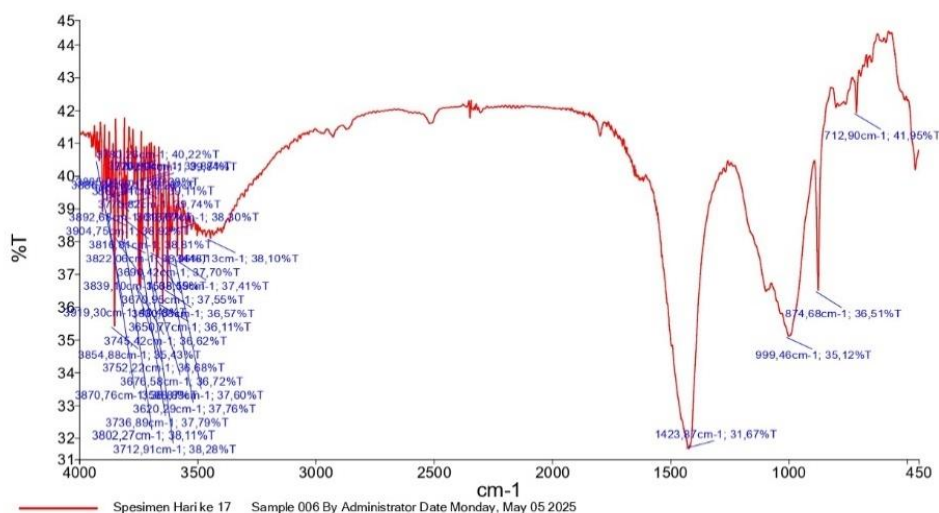
Gambar 4. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 13 hari perendaman

Pada 13 hari perendaman, terjadi pergeseran dan perubahan intensitas puncak. Puncak pada 2354.87 cm^{-1} (19.62%T) dan 2514.48 cm^{-1} (17.26%T) masih dominan, namun intensitasnya sedikit menurun dibandingkan 9 hari. Puncak karbonil pada 1797.57 cm^{-1} (10.68%T) menunjukkan stabilitas. Munculnya puncak baru pada 3682.33 cm^{-1} (7.17%T) dan peningkatan intensitas pada 3484.83 cm^{-1} (3.86%T) mengindikasikan peningkatan gugus O-H, yang mungkin disebabkan oleh penyerapan kelembaban atau pembentukan produk hidroksilasi. Perubahan pada daerah sidik jari, seperti puncak pada 983.38 cm^{-1} (0.14%T) dan 611.88 cm^{-1} (1.96%T), serta pergeseran pada 757.10 cm^{-1} (4.35%T), 778.08 cm^{-1} (4.69%T), dan 797.98 cm^{-1} (4.80%T), menunjukkan adanya modifikasi struktural pada material.



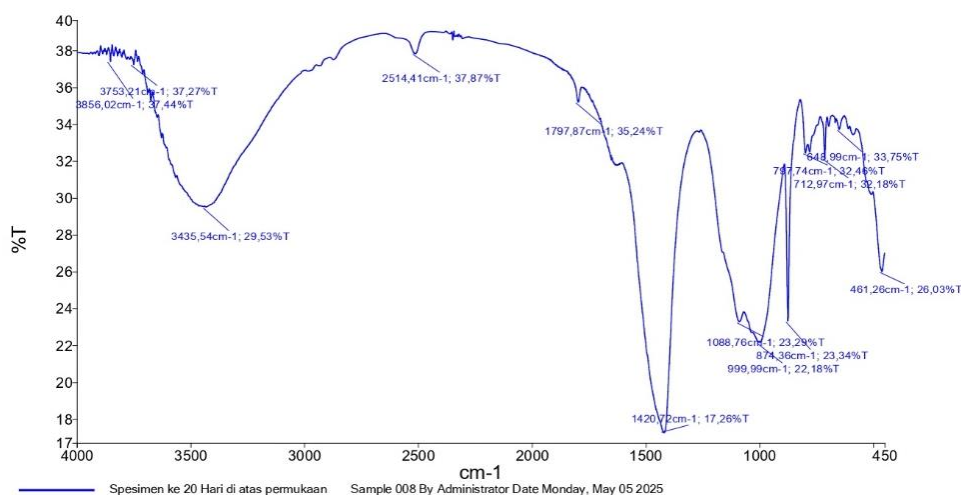
Gambar 5. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 15 hari perendaman

Spektrum pada 15 hari menunjukkan pola yang serupa dengan 9 dan 13 hari, dengan puncak pada 2346.13 cm^{-1} (18.60%T) dan 2514.47 cm^{-1} (16.91%T) yang terus menurun intensitasnya. Puncak karbonil pada 1797.77 cm^{-1} (10.37%T) tetap konsisten. Puncak O-H pada 3435.43 cm^{-1} (5.56%T) menunjukkan sedikit peningkatan dibandingkan 9 hari. Perubahan pada daerah sidik jari, seperti puncak pada 1090.75 cm^{-1} (0.60%T) dan munculnya puncak pada 513.62 cm^{-1} (2.54%T), mengindikasikan evolusi lebih lanjut dari struktur molekul.



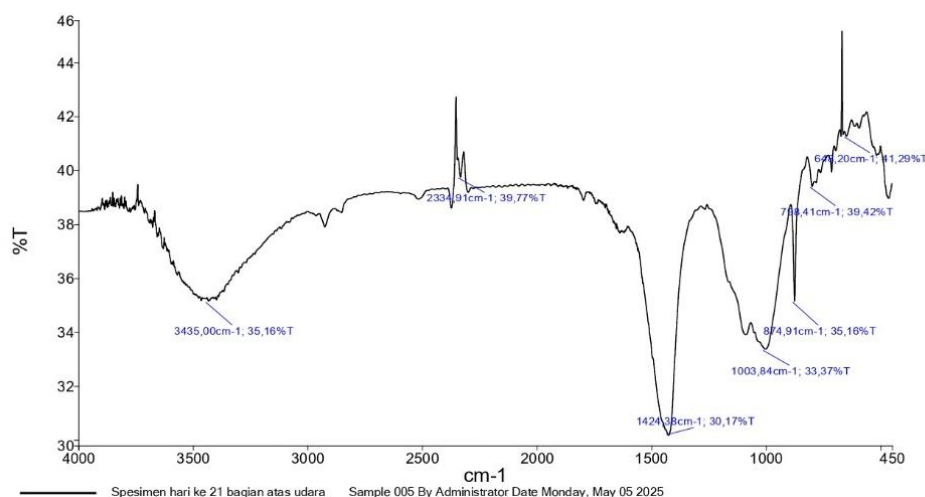
Gambar 6. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 17 hari perendaman

Pada hari ke-17 (penyerapan kelembapan tinggi), Spektrum menunjukkan lonjakan signifikan puncak --OH di atas 3900 cm^{-1} dan $\sim 3437 \text{ cm}^{-1}$. Kondisi ini menunjukkan penyerapan kelembapan intens pada permukaan beton. Peningkatan kelembapan pori dapat mempercepat difusi ion klorida dari uap garam menuju ke dalam beton, sesuai mekanisme yang dilaporkan (Shi et al., 2012). Fenomena ini menjadi tahap kritis karena memperbesar risiko depasivasi lapisan pasif baja tulangan lebih awal.

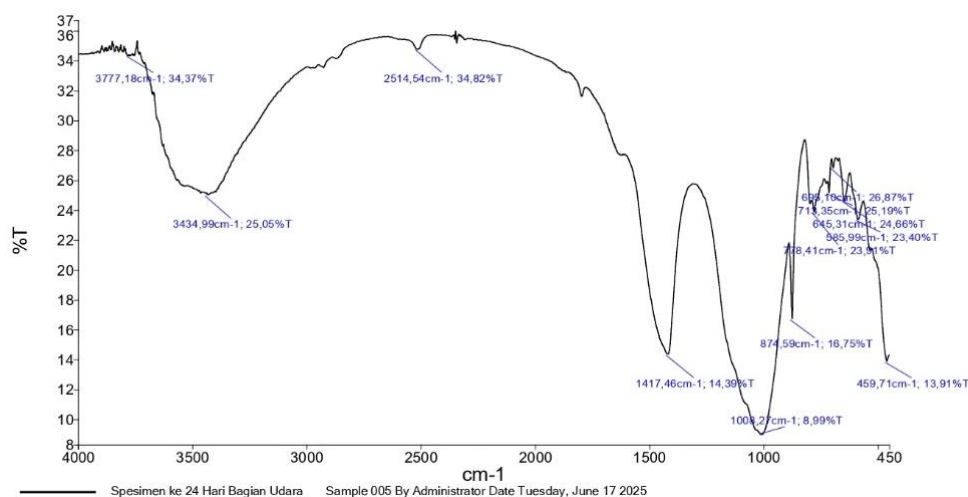


Gambar 7. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 20 hari perendaman

Hari ke-20 hingga ke-21 (Karbonasi Lanjutan), dimana CaCO_3 semakin dominan, terlihat dari peningkatan puncak karbonat pada 1420 cm^{-1} , sementara puncak --OH Ca(OH)_2 terus menurun. C--S--H masih stabil, yang menunjukkan bahwa meskipun alkalinitas menurun, matriks silikat hidrasi belum terdegradasi secara masif. Kondisi ini dapat mempertahankan permeabilitas rendah untuk sementara, namun perlindungan ini bersifat terbatas (Bertolini et al., 2013).

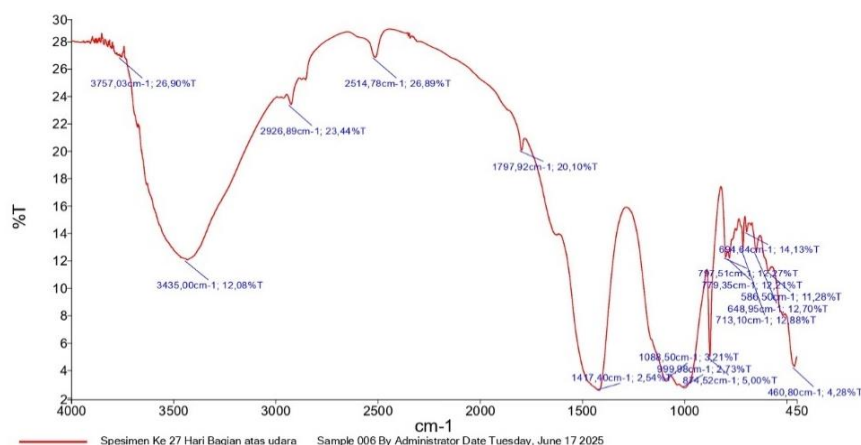


Gambar 8. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 21 hari perendaman



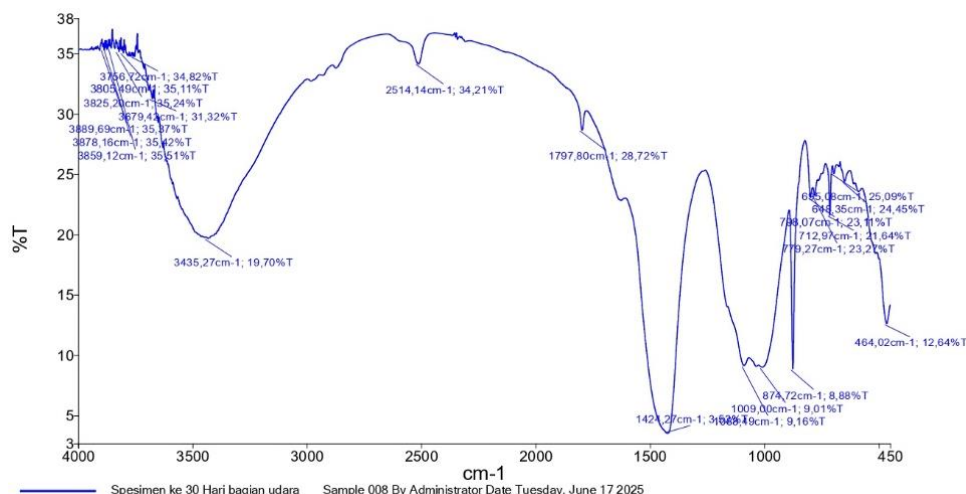
Gambar 9. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 24 hari perendaman

Hari ke-24 hingga ke-27 (Dominasi CaCO_3 dan Penurunan Drastis $-\text{OH}$), dimana Intensitas puncak $-\text{OH}$ menurun tajam, menandakan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hampir habis di permukaan. Dominasi CaCO_3 menunjukkan pH beton sudah berada di zona kritis ($<\text{pH } 9$). Pada fase ini, walaupun C-S-H masih ada, kemunculan silika bebas pada $\sim 460\text{--}470\text{ cm}^{-1}$ menjadi indikator awal dekomposisi matriks hidrasi yang dapat meningkatkan porositas dan memfasilitasi penetrasi klorida.



Gambar 10. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 27 hari perendaman

Pada hari ke-27, intensitas puncak O-H pada 3435.00 cm^{-1} (12.08%T) semakin menurun. Puncak karbonil pada 1797.92 cm^{-1} (20.10%T) dan puncak alkana pada 2926.89 cm^{-1} (23.44%T) dan 2514.78 cm^{-1} (26.89%T) masih terdeteksi. Puncak-puncak di daerah sidik jari seperti 1417.40 cm^{-1} (2.54%T), 999.98 cm^{-1} (2.73%T), 1088.50 cm^{-1} (3.21%T), 874.52 cm^{-1} (5.00%T), 797.51 cm^{-1} (12.27%T), 779.35 cm^{-1} (12.21%T), 713.10 cm^{-1} (12.88%T), 694.64 cm^{-1} (14.13%T), 648.95 cm^{-1} (12.70%T), dan 586.50 cm^{-1} (11.28%T) menunjukkan penurunan intensitas yang konsisten dengan degradasi material.



Gambar 11. Spectrum FTIR spesimen di Permukaan Air Laut Buatan selama 30 hari perendaman

Puncak –OH hampir tidak terdeteksi, menandakan hilangnya kapasitas penyangga alkalinitas. CaCO_3 mendominasi, sementara C–S–H mulai disertai silika bebas. Kondisi ini secara teoretis setara dengan fase pra-korosi aktif, di mana lapisan pasif baja sudah rentan dan ion klorida dapat langsung menginisiasi korosi (Poursae & Angst, 2023).

Hasil FTIR mengindikasikan hubungan erat antara karbonasi progresif, penyerapan kelembapan, dan potensi difusi ion klorida. Karbonasi menurunkan pH beton dari kisaran 12,5–13 menjadi <9 , sehingga lapisan pasif baja tidak stabil (Poursae & Angst, 2023). Kelembapan tinggi pada hari ke-17 mempercepat transportasi ion klorida melalui mekanisme difusi dan kapilaritas (Shi et al., 2012). Hilangnya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dan kemunculan silika bebas pada akhir periode menunjukkan degradasi matriks yang dapat meningkatkan porositas dan permeabilitas beton (Cheng et al., 2024). Dominasi CaCO_3 di permukaan bukan hanya tanda karbonasi, tetapi juga mengurangi kemampuan beton untuk menahan ion agresif karena hilangnya sifat buffer alkalin. Dengan demikian, kombinasi karbonasi dan penetrasi kelembapan pada periode awal (hari ke-17) kemungkinan menjadi faktor kunci yang mempercepat depasivasi baja tulangan, memperpendek umur layan struktur di lingkungan laut.

4. SIMPULAN

Karbonasi progresif terdeteksi sejak awal paparan (hari ke-9) melalui penurunan bertahap intensitas puncak –OH ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan peningkatan puncak CO_3^{2-} (CaCO_3). Proses ini menurunkan alkalinitas beton dari kondisi awal ($\sim\text{pH}$ 12,5–13) menuju zona kritis depasivasi baja ($\sim\text{pH}$ <9). Peningkatan kelembapan signifikan pada hari ke-17, ditunjukkan oleh lonjakan puncak –OH pada spektrum FTIR, berpotensi mempercepat difusi ion klorida melalui pori beton dan memperbesar risiko inisiasi korosi tulangan. Fase hidrasi silikat (C–S–H) tetap terdeteksi sepanjang 30 hari paparan, menunjukkan stabilitas parsial matriks beton. Namun, kemunculan silika bebas pada akhir periode mengindikasikan awal degradasi C–S–H yang dapat meningkatkan porositas dan permeabilitas beton. Pada akhir periode (hari ke-30), CaCO_3 mendominasi komposisi permukaan beton, sementara $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hampir tidak terdeteksi. Kondisi ini secara teoretis menandakan fase pra-korosi aktif, di mana lapisan pasif baja tulangan sudah rentan terhadap penetrasi ion klorida. Kombinasi karbonasi cepat dan penyerapan kelembapan pada periode awal merupakan faktor utama yang mempercepat penurunan ketahanan korosi beton bertulang di lingkungan laut buatan.

5. SARAN

- a. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengombinasikan analisis FTIR dengan metode elektro-kimia, seperti pengukuran potensial korosi, resistivitas listrik beton, atau teknik polarisasi, guna memperoleh hubungan kuantitatif antara perubahan senyawa kimia beton dan laju inisiasi korosi tulangan.
- b. Untuk meningkatkan kontribusi praktis penelitian, disarankan agar hasil FTIR dikembangkan menjadi parameter kuantitatif yang dapat diintegrasikan ke dalam model prediksi umur layan struktur beton bertulang di lingkungan laut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin dan laboratorium Terpadu Universitas Teuku Umar yang telah memberikan akses kepada peneliti untuk melakukan penelitian di laboratorium tersebut

DAFTAR PUSTAKA

- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete—A review. *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1122–1138.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. B. (2013). *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. John Wiley & Sons.
- Broomfield, J. P. (2023). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. Crc Press.
- Cheng, L., Jin, H., Liu, J., Liu, J., Zhu, J., & Xing, F. (2024). A novel approach for determining the chloride ion diffusion coefficient in seawater sand concrete: The extravasation method. *Construction and Building Materials*, 441, 137454.
- dos Santos, V. H. J. M., Pontin, D., Ponzi, G. G. D., e Stepanha, A. S. de G., Martel, R. B., Schütz, M. K., Einloft, S. M. O., & Dalla Vecchia, F. (2021). Application of Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) coupled with multivariate regression for calcium carbonate (CaCO₃) quantification in cement. *Construction and Building Materials*, 313, 125413.
- Feng, G., Zhu, D., Guo, S., Rahman, M. Z., Ma, W., Yi, Y., Jin, Z., & Shi, C. (2023). A comparative study of bare and seawater sea sand concrete wrapped basalt fiber-reinforced polymer bars exposed to laboratory and real marine environments. *Construction and Building Materials*, 371, 130764.
- Fonna, S., Huzni, S., & Ariffin, A. K. (2018). Boundary element inverse analysis for rebar corrosion detection: Study on the 2004 tsunami-affected structure in Aceh. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 292–298.
- Fonna, S., Ridha, M., Huzni, S., Walid, W. A., Mulya, T. T. D., & Ariffin, A. K. (2017). Corrosion risk of RC buildings after ten years the 2004 tsunami in Banda Aceh-Indonesia. *Procedia Engineering*, 171, 965–976.
- Foulhudan, J., Nurtanto, D., & Krisnamurti, K. (2022). Perbandingan Mix Design Sni 03-2834-2000 Dan Sni 7656: 2012 Ditinjau Dari Proses Pengecoran Beton Normal. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 5(2), 98–107.
- Jagodang Harahap, W. H. L. (2022). Analisis Eksperimental Dan Numerik Uji Tarik Hasil Pengelasan Smaw Pada Baja Karbon Rendah Dengan Variasi Jenis Elektroda Terhadap Sifat Mekanis. *VOCATECH: Vocational Education and Technology*, 4(1), 8–17. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.38038/vocatech.v4i1.00>
- Poursae, A., & Angst, U. M. (2023). Principles of corrosion of steel in concrete structures. In *Corrosion of steel in concrete structures* (pp. 17–34). Elsevier.
- Qu, F., Zhao, H., Wu, K., Liu, Y., Zhao, X., & Li, W. (2023). Phase transformation and microstructure of in-situ concrete after 20-year exposure to harsh mining environment: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02287.
- Rafi, M. M., & Nasir, M. M. (2016). Models for prediction of 28-day concrete compressive strength. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(3), 1217–1228.
- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J. (2012). Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials*, 30, 125–138.
- Sukhairi, T. A., Harahap, J., & Wahyu Santoso, D. (2023). Analisis Kinematik Manuver Terbang Vertikal Pada Komponen Swash Plate, Rotor Head Dan Rotor Blades Helikopter Sejenis Nbo - 105 Menggunakan Catia V5r16. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 4(2). <https://doi.org/10.38038/vocatech.v4i2.114>

- Susanto, H., Huzni, S., & Fonna, S. (2018). Corrosion of Reinforced Concrete Structures Submerged by the 2004 Tsunami in West Aceh, Indonesia. *International Journal of Corrosion*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4318434>
- Susanto, H., Ridha, M., Huzni, S., & Fonna, S. (2015). *Korosi Infrastruktur Beton Bertulang di Kabupaten Aceh Barat Pasca Tsunami 2004*.
- Susanto, H., Ridha, M., Huzni, S., & Fonna, S. (2016). Korosi Infrastruktur Beton Bertulang Pada Bangunan Terendam Tsunami. *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XV (SNTTM XV)*, 594–599.
- Susanto, H., Supardi, J., & Fonna, S. (2019). Degradation of reinforced concrete corrosion on coast after the 2004 tsunami. *Journal of Corrosion Science and Engineering*, 22.
- Tanjung, I. (2022). Analisis Morfologi Serat Dan Kekuatan Impak Bahan Komposit Berpenguat Serat Pinang (Areca Catechu) Yang Telah Dilakukan Perbaikan Sifat Fisik. *Vocatech: Vocational Education and Technology Journal*, 4(1), 1–7. <https://doi.org/10.38038/vocatech.v4i1.108>
- White, J. L. (2023). *The Effect of Initial Curing Temperature and Duration on the 28-Day Compressive Strength of Concrete*. Auburn University.
- Xie, Y., Ma, K., Long, G., & Shi, M. (2006). Influence of mineral admixture on chlorid ion permeability of concrete. *Journal-Chinese Ceramic Society*, 34(11), 1345.