

Analisis Senyawa Pemicu Korosi pada Beton Bertulang Terpapar Klorida Menggunakan FTIR

Herdi Susanto^{*1}, Zakir Husin², Syurkarni Ali³, Bambang Tripoli⁴, Yufrizal⁵

^{1,2,3,5}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Indonesia

⁴Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Indonesia

*e-mail : herdisusanto@utu.ac.id

Abstrak

Degradasi beton bertulang akibat penetrasi ion klorida merupakan salah satu penyebab utama penurunan durabilitas struktur di lingkungan laut. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan kimia pada beton bertulang sebelum dan sesudah direndam dalam air laut buatan melalui pendekatan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Spesimen beton bertulang direndam dalam larutan NaCl 3,5% selama 15 dan 30 hari untuk mengevaluasi evolusi gugus fungsi yang berkaitan dengan hidrasi semen, karbonasi, dan pembentukan senyawa klorida terikat. Hasil FTIR menunjukkan bahwa pada kondisi awal, karakteristik spektrum didominasi oleh gugus O–H, Si–O, dan CO₃²⁻ tanpa adanya indikasi interaksi dengan klorida. Setelah 15 hari perendaman, terjadi penurunan intensitas pita O–H, modifikasi vibrasi Si–O, serta munculnya pita baru pada rentang 600–800 cm⁻¹ yang mengindikasikan tahapan awal pembentukan senyawa aluminat–klorida. Pada hari ke-30, perubahan spektral semakin jelas dengan penguatan pita karbonat, pergeseran puncak Si–O, dan peningkatan intensitas pita 460–750 cm⁻¹ yang kompatibel dengan pembentukan Friedel's salt. Temuan ini menunjukkan bahwa FTIR mampu mendeteksi perubahan kimia mikrostruktur secara bertahap akibat penetrasi klorida, mulai dari modifikasi C–S–H hingga terbentuknya klorida terikat. Dengan demikian, FTIR terbukti efektif sebagai metode identifikasi dini proses degradasi dan korosi pada beton bertulang di lingkungan laut.

Kata kunci— FTIR, klorida, beton bertulang, durabilitas, air laut buatan.

Abstract

The degradation of reinforced concrete due to chloride ion penetration is one of the main factors contributing to reduced durability of structures in marine environments. This study aims to analyze the chemical changes in the cement matrix of reinforced concrete before and after immersion in synthetic seawater using Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Reinforced concrete specimens were immersed in a 3.5% NaCl solution for 15 and 30 days to evaluate the evolution of functional groups associated with cement hydration, carbonation, and the formation of bound chloride compounds. The FTIR results show that in the initial condition, the spectrum is dominated by O–H, Si–O, and CO₃²⁻ functional groups without any indication of chloride interaction. After 15 days of immersion, a decrease in O–H band intensity, modifications in Si–O vibrations, and the emergence of new peaks in the 600–800 cm⁻¹ region indicate the early formation of aluminate–chloride compounds. After 30 days, spectral changes become more pronounced with strengthened carbonate bands, shifts in Si–O peaks, and increased intensity in the 460–750 cm⁻¹ range, which is consistent with the formation of Friedel's salt. These findings demonstrate that FTIR can detect gradual chemical changes due to chloride penetration, ranging from C–S–H modification to the formation of bound chlorides. Therefore, FTIR is proven effective as an early diagnostic method for identifying degradation and corrosion processes in reinforced concrete exposed to marine environments.

Keywords— FTIR, chloride, reinforced concrete, durability, artificial seawater.

1. PENDAHULUAN

Degradasi beton bertulang akibat penetrasi ion klorida merupakan mekanisme kerusakan kimia utama pada struktur di lingkungan laut [1] dan lingkungan yang mengandung garam [2][3], di mana ion klorida menembus pori-pori beton [4], bereaksi dengan produk hidrasi semen, dan dapat merusak lapisan pasif pada baja tulangan sehingga memicu korosi [1].

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) adalah teknik efektif untuk menganalisis perubahan struktural dan komposisi kimia pada pasta semen hidrat, termasuk identifikasi gugus fungsi utama seperti C-S-H, Ca(OH)_2 , dan karbonat, serta mendeteksi pembentukan senyawa sekunder akibat reaksi dengan ion klorida [5][6].

FTIR memungkinkan pemahaman mendalam tentang interaksi kimia antara ion klorida dan matriks beton yang tidak dapat diperoleh hanya melalui pengujian mekanik atau elektrokimia, serta membantu menjelaskan penurunan kekuatan dan perubahan mikrostruktur beton [7][8]. Analisis FTIR juga mengungkap mekanisme pembentukan senyawa klorida terikat seperti Friedel's salt dan perubahan struktur C-S-H yang menyebabkan ketidakstabilan mikrostruktur, yang penting untuk merumuskan strategi mitigasi seperti penggunaan bahan tambahan mineral dan optimasi campuran beton [6][9]. Studi jangka panjang menunjukkan bahwa paparan klorida mengubah profil kimia dan mikrostruktur beton, sehingga mempengaruhi durabilitas dan masa layanan struktur di lingkungan agresif [8][10]. Dengan demikian, FTIR berperan penting dalam memahami hubungan antara kerusakan mikrostruktural dan durabilitas beton bertulang, mendukung pengembangan desain beton yang lebih tahan lama di lingkungan klorida.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan kimia pada beton bertulang sebelum dan sesudah direndam dalam air laut buatan selama 15 dan 30 hari, melalui pendekatan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) untuk menentukan resiko korosi pada beton bertulang dilingkungan air laut buatan.

2. METODE PENELITIAN

Metode eksperimental digunakan untuk mengidentifikasi senyawa kimia yang terbentuk pada beton bertulang setelah diendam dalam larutan natrium klorida 3,5%. Metode FTIR digunakan karena dapat mendeteksi gugus fungsi tertentu yang berubah karena interaksi ion klorida dengan matriks semen.. Pengujian dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Teuku Umar menggunakan instrumen FTIR tipe Spectrum Two dengan detektor LiTaO_3 dan rentang panjang gelombang 8300–350 cm^{-1} .

Sebelum pengujian FTIR, sampel beton bertulang dipersiapkan dengan mengeringkannya selama 7 hari di laboratorium. Kemudian spesimen yang berjumlah 9 buah, dimana 6 spesimen direndam dalam air laut buatan dan 3 spesimen tidak direndam

Sampel beton kemudian diproses dengan pengeboran ringan pada bagian permukaan untuk memperoleh bubuk halus yang merepresentasikan zona yang telah terpapar ion klorida, untuk spesimen yang direndam dalam air laut buatan dengan lama perendaman 15 dan 30 hari. Sedangkan untuk spesimen yang tidak direndam, maka langsung dibor permukaan spesimen untuk diambil sampel beton.

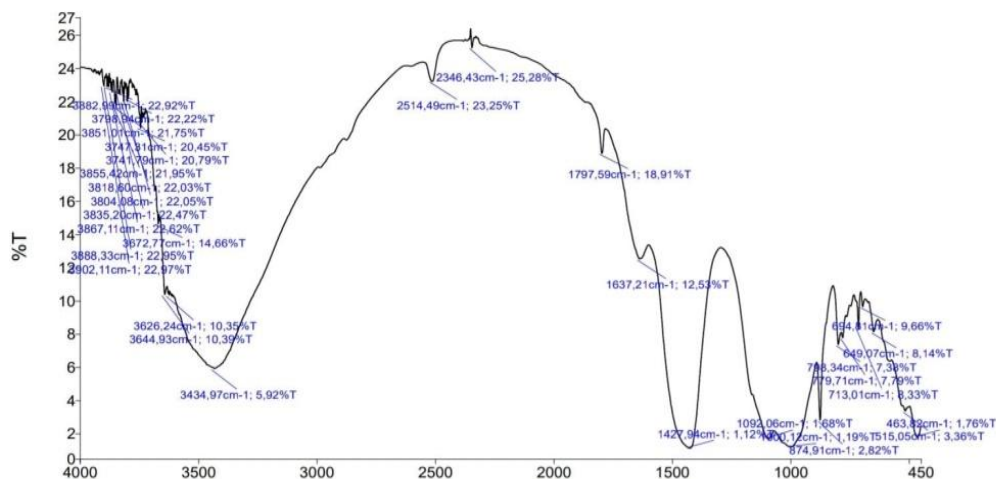
Instrumen FTIR dioperasikan dengan resolusi 4 cm^{-1} dan rentang penuh scan 4000–400 cm^{-1} . Minimal 32 kali pemindaian dilakukan pada setiap sampel untuk meningkatkan akurasi sinyal dan mengurangi noise spektrum. Kurva transmisi (%T) terhadap bilangan gelombang (cm^{-1}) adalah hasilnya, seperti yang ditunjukkan pada gambar yang dilampirkan. Spektrum referensi bahan semen, produk hidrasi (seperti ettringite, portlandite, C-S-H), dan senyawa korosi berbasis klorida seperti garam Friedel diidentifikasi dan dibandingkan dengan pita serapan utama [11][12].

Puncak serapan karakteristik diidentifikasi untuk analisis spektrum. Pita -OH berada pada $3400\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, vibrasi karbonat berada pada $1400\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, dan pita Si-O-Si dan Si-O berada pada $900\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$. Untuk mengetahui seberapa besar penetrasi ion klorida mempengaruhi struktur kimia pasta semen, yang berkontribusi pada degradasi material dan korosi baja tulangan [13][14], puncak anomali atau perubahan intensitas dibandingkan beton normal digunakan. Analisis FTIR secara komparatif terhadap variasi waktu perendaman dapat mengungkap tren pembentukan senyawa korosi dan perubahan kimia yang terjadi selama paparan klorida [15][16]. Untuk mengetahui tren pembentukan senyawa terkait korosi, seluruh hasil spektrum direkap dan dibandingkan dengan variasi waktu perendaman. Perubahan intensitas puncak dan pergeseran bilangan gelombang adalah dua indikator utama yang digunakan untuk membedakan. Metode ini menggunakan FTIR untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang perubahan kimia yang terjadi pada beton bertulang ketika terpapar klorida. Ini memberikan dasar untuk analisis lebih lanjut tentang proses degradasi material.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji FTIR Beton Bertulang Sebelum Direndam dalam Air Laur Buatan

Spektrum FTIR pada kondisi awal (belum direndam) menunjukkan karakteristik khas material berbasis semen hidratisasi. Beberapa puncak absorbansi utama yang muncul menggambarkan keberadaan gugus fungsi yang berasal dari senyawa hidrat seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H), kalsium hidroksida (Ca(OH)_2), serta sisa-sisa fase semen yang belum bereaksi. Analisis terhadap spektrum ini penting sebagai baseline untuk dibandingkan dengan kondisi setelah perendaman klorida. Hasil pengujian FTIR beton bertulang sebelum direndam dalam air laur buatan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Hasil pengujian FTIR beton bertulang sebelum direndam dalam air laur buatan

Gambar 3.1. menunjukkan bahwa. Pertama, pita serapan kuat pada daerah $3434\text{--}3880\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi rentangan O-H dari molekul air terikat dan gugus hidroksil. Kehadiran pita ini menandakan bahwa sampel beton bertulang masih mengandung air hidratisasi alami yang terbentuk dari proses hidrasi semen. Intensitas pita yang cukup besar menunjukkan bahwa struktur C-S-H dan Ca(OH)_2 berada dalam kondisi normal tanpa adanya interaksi dengan ion klorida.

Selanjutnya, pita pada kisaran 1637 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi tekuk (bending) molekul H-O-H dari air terikat pada gel C-S-H . Puncak ini biasanya muncul pada beton normal dan memperkuat indikasi bahwa sebelum perendaman, sampel berada dalam keadaan

hidratasi stabil tanpa tanda-tanda pembentukan senyawa klorida seperti Friedel's salt ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{Cl}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), yang biasanya menghasilkan pita tambahan pada sekitar $550\text{--}850\text{ cm}^{-1}$.

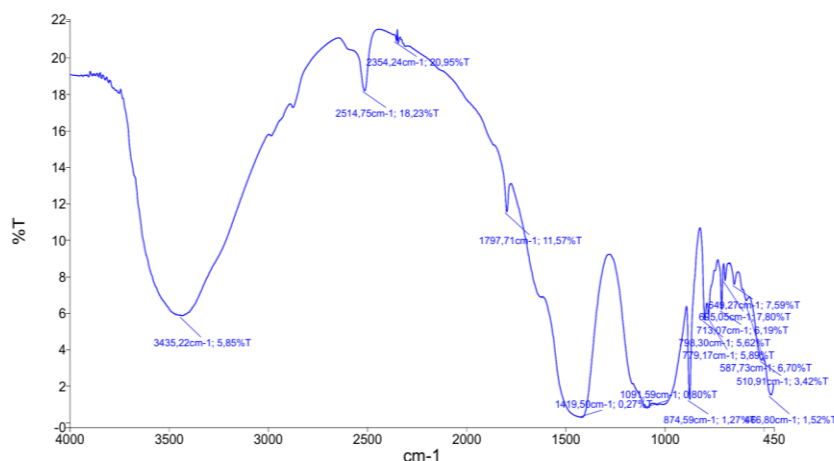
Pita serapan pada daerah $1427\text{--}1797\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan keberadaan karbonat (CO_3^{2-}) akibat proses karbonasi permukaan yang umum terjadi pada beton yang terpapar udara. Karbonasi ringan ini wajar ditemukan pada sampel sebelum perlakuan, dan tidak mengindikasikan kerusakan struktural. Pita ini berkaitan dengan pembentukan CaCO_3 dari reaksi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dengan CO_2 atmosfer.

Pada rentang $460\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$, beberapa puncak muncul sebagai karakteristik utama struktur C-S-H, khususnya vibrasi Si-O-Si dan Si-O. Pita dominan di sekitar 1020 cm^{-1} menunjukkan keberadaan fase silikat sebagai komponen utama struktur gel hidrasi. Ini menandakan bahwa struktur internal beton berada dalam kondisi normal dan belum terjadi intrusi ion klorida.

Secara keseluruhan, spektrum FTIR awal menunjukkan bahwa beton bertulang masih dalam kondisi stabil sebelum direndam. Tidak ditemukan pita absorbansi yang mengarah pada pembentukan klorida terikat (bound chloride), sehingga spektrum ini dapat digunakan sebagai acuan dasar (baseline) untuk membandingkan perubahan kimia yang terjadi setelah sampel mengalami perendaman dalam air laut buatan. Hasil ini juga memastikan bahwa perubahan pada spektrum berikutnya dapat diatribusikan secara jelas terhadap proses penetrasi ion klorida.

3.2. Hasil Uji FTIR Beton Bertulang Setelah 15 hari Direndam dalam Air Laur Buatan

Spektrum FTIR setelah 15 hari perendaman ditunjukkan pada Gambar 3.2., menunjukkan perubahan karakteristik dibandingkan baseline (sebelum perendaman). Pada domain O-H (kisaran $\sim 3200\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$) terlihat penurunan relatif intensitas pita rentangan O-H dibanding spektrum awal, yang mengindikasikan adanya redistribusi atau sebagian pelepasan air terikat akibat interaksi ion klorida dengan fase hidrasi. Perubahan ini konsisten dengan modifikasi struktur gel C-S-H yang sering muncul pada fase awal penetrasi ion agresif.



Gambar 3.2. Hasil pengujian FTIR beton bertulang setelah 15 hari direndam dalam air laur buatan

Gambar 3.2. menunjukkan wilayah mid-IR (sekitar $1400\text{--}1650\text{ cm}^{-1}$) terdapat penguatan pita yang terkait dengan gugus karbonat (CO_3^{2-}). Penguatan ini dapat menandai adanya karbonasi permukaan sekunder, kemungkinan akibat reaksi antara $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terdifusi dan CO_2 atmosfer selama proses penyiapan/penanganan sampel, atau sebagai hasil reaksi sekunder yang dipengaruhi perubahan kimia oleh klorida. Hal ini penting karena

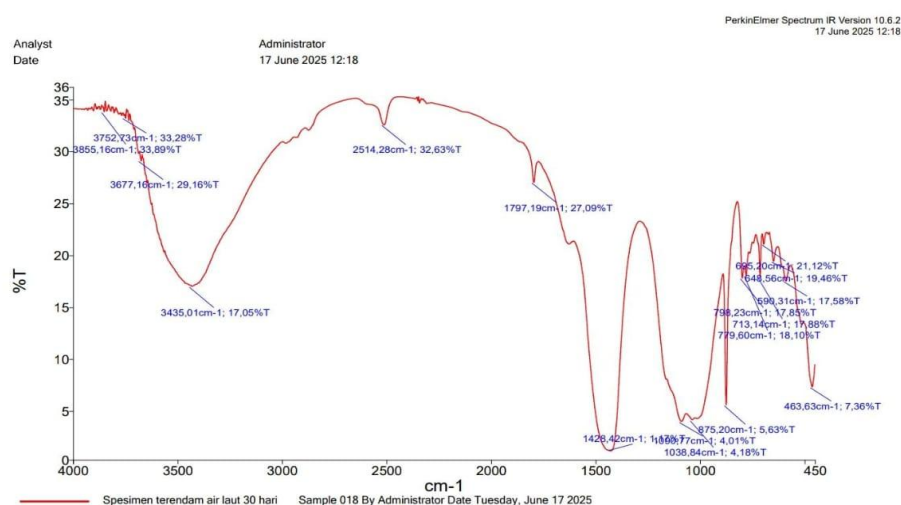
karbonasi dapat menurunkan alkalinitas lokal dan berkontribusi pada hilangnya pasivitas tulangan bila terjadi bersamaan dengan penetrasi klorida.

Perubahan paling menonjol nampak pada region “fingerprint” ($\sim 400\text{--}900\text{ cm}^{-1}$) dan rentang Si–O ($\sim 900\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$). Munculnya atau penguatan pita baru yang tersesuaian di sekitar daerah bawah 800 cm^{-1} mengindikasikan pembentukan fase terikat klorida (mis. perubahan yang kompatibel dengan uji literatur untuk Friedel’s salt atau kompleks aluminat-klorida). Selain itu, pergeseran dan/atau penurunan intensitas pada pita Si–O (sekitar $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$) mengisyaratkan perubahan jaringan silikat (C–S–H) — kemungkinan depolimerisasi atau reorientasi struktur akibat ion klorida yang memasuki gel.

Interpretasi ini didukung oleh pola keseluruhan spektrum: serangkaian penyesuaian intensitas dan beberapa puncak baru yang muncul setelah 15 hari perendaman menunjukkan bahwa reaksi kimia antara klorida dan fase hidrasi semen telah dimulai pada tingkat yang dapat dideteksi FTIR.

Secara praktis, temuan FTIR pada hari ke-15 menunjukkan tahap awal transformasi kimia dari matriks beton: modifikasi pada C–S–H, indikasi pembentukan senyawa klorida terikat, serta tanda-tanda karbonasi permukaan. Kombinasi perubahan ini berimplikasi pada penurunan kapasitas ikat klorida dan potensi pengurangan alkalinitas lokal yang berisiko mempercepat hilangnya pasivitas pada baja tulangan jika eksposur berlanjut.

3.2. Hasil Uji FTIR Beton Bertulang Setelah 30 hari Direndam dalam Air Laur Buatan



Gambar 3.3. Hasil pengujian FTIR beton bertulang setelah 30 hari direndam dalam air laur buatan

Spektrum FTIR setelah 30 hari perendaman menunjukkan perubahan yang lebih jelas dibandingkan kondisi awal dan setelah 15 hari, menandakan perkembangan reaksi kimia antara ion klorida dan fase hidrasi semen. Pada region O–H, pita-pita khas muncul pada sekitar $3750\text{--}3670\text{ cm}^{-1}$ dan pita broadband pada $\sim 3435\text{ cm}^{-1}$ (vibrasi O–H). Kehadiran pita ini menegaskan eksistensi air terikat dan fase portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Namun, relatif terhadap spektrum awal intensitas relatif pita O–H tampak menurun sedikit—mengindikasikan sebagian konsumsi atau redistribusi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang dapat berkaitan dengan reaksi sekunder dengan ion klorida atau proses karbonasi lokal.

Di kawasan $1400\text{--}880\text{ cm}^{-1}$ terlihat beberapa perubahan penting. Puncak karbonat pada $\sim 1428\text{ cm}^{-1}$ dan pita pada $\sim 875\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya peningkatan karbonasi permukaan

yang teramati setelah perendaman. Karbonasi ini kemungkinan terjadi sekunder selama penanganan/eksposur atau akibat interaksi kimia yang memobilisasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sehingga bereaksi dengan CO_2 atmosfer. Penebalan pita karbonat berimplikasi pada penurunan alkalinitas lokal yang meningkatkan kerentanan tulangan terhadap korosi bila klorida terus masuk.

Perubahan paling relevan terhadap keberadaan klorida tampak di region “fingerprint” dan daerah rendah bilangan gelombang, khususnya munculnya/ penguatan pita pada sekitar $\sim 713\text{ cm}^{-1}$, $\sim 663\text{ cm}^{-1}$, dan daerah $460\text{--}500\text{ cm}^{-1}$. Deretan pita di kisaran tersebut kompatibel dengan pembentukan fase aluminat-klorida terikat (mis. Friedel’s salt atau kompleks aluminat-Cl), yang pada literatur sering menunjukkan serapan pada rentang $\sim 600\text{--}750\text{ cm}^{-1}$. Munculnya fitur-fitur ini setelah 30 hari mengindikasikan bahwa ion Cl^- tidak hanya tersebar sebagai ion bebas tetapi mulai berinteraksi dan berikatan dengan fase aluminat dalam pasta semen.

Peak di sekitar $\sim 1038\text{ cm}^{-1}$ (Si-O stretching, C-S-H) mengalami pergeseran dan/atau perubahan intensitas dibanding kondisi awal. Perubahan ini mengindikasikan modifikasi jaringan silikat C-S-H—bisa berupa depolimerisasi atau perubahan komposisi gel akibat penetrasi klorida—yang secara langsung mempengaruhi kekuatan dan integritas mikrostruktur. Perubahan struktural C-S-H ini sejalan dengan meningkatnya keberadaan fase terikat klorida dan karbonasi, yang bersama-sama menurunkan kapasitas ikat ion dan kestabilan matriks.

Beberapa fitur spektrum lain, seperti puncak di $\sim 1797\text{ cm}^{-1}$ dan puncak di sekitar $\sim 2514\text{ cm}^{-1}$, perlu perlakuan interpretatif hati-hati: pita $\sim 1797\text{ cm}^{-1}$ dapat berasal dari vibrasi karbonil terabsorpsi atau produk organik/minor, sementara pita $\sim 2514\text{ cm}^{-1}$ berpotensi merupakan overtone, artifact instrument, atau kontribusi CO_2 /penanganan sampel. Oleh karena itu, konfirmasi lebih lanjut dengan teknik komplementer sangat dianjurkan.

Secara keseluruhan, spektrum setelah 30 hari menandakan perkembangan reaksi antara klorida dan fase hidrasi semen: (1) indikasi pembentukan fase klorida-terikat (mis. Friedel’s salt), (2) perubahan pada jaringan C-S-H, dan (3) peningkatan karbonasi permukaan. Implikasi praktisnya adalah berkurangnya alkalinitas lokal dan meningkatnya risiko hilangnya pasivitas pada tulangan jika paparan berlanjut.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis FTIR pada beton bertulang yang diuji sebelum dan sesudah perendaman dalam air laut buatan, dapat disimpulkan bahwa telah terjadi perubahan kimiawi signifikan pada matriks pasta semen akibat penetrasi ion klorida. Pada kondisi awal, spektrum FTIR menunjukkan karakteristik umum beton normal, yaitu dominasi gugus O-H, Si-O, dan CO_3^{2-} yang merepresentasikan keberadaan C-S-H, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dan karbonat permukaan tanpa indikasi pembentukan senyawa klorida terikat.

Setelah 15 hari perendaman, spektrum menunjukkan penurunan intensitas pita O-H, perubahan pada pita Si-O, serta munculnya beberapa puncak baru pada rentang $600\text{--}800\text{ cm}^{-1}$. Hal ini mengindikasikan awal terbentuknya senyawa klorida terikat serta terjadinya modifikasi struktur C-S-H akibat interaksi ion klorida dengan fase hidrat semen. Pada tahap ini, reaksi kimia masih berlangsung pada tingkat moderat, menandakan fase awal penetrasi klorida yang mulai mereduksi stabilitas mikrostruktur.

Pada perendaman 30 hari, perubahan spektral semakin jelas. Penguatan pita karbonat, pergeseran puncak Si-O, serta munculnya pita intens pada rentang $460\text{--}750\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan terbentuknya senyawa aluminat-klorida seperti Friedel’s salt. Kondisi ini menegaskan bahwa klorida telah berikatan dengan fase aluminat dalam pasta semen dan menyebabkan perubahan lebih lanjut pada struktur C-S-H. Fenomena ini menurunkan alkalinitas lokal dan meningkatkan potensi hilangnya lapisan pasif pada tulangan.

5. SARAN

Secara keseluruhan, hasil FTIR mengonfirmasi bahwa penetrasi klorida menyebabkan perubahan bertahap pada struktur kimia beton: dimulai dari modifikasi ringan pada hidrasi, kemudian pembentukan senyawa klorida terikat, hingga ketidakstabilan mikrostruktur yang lebih nyata pada hari ke-30. Temuan ini menegaskan bahwa FTIR efektif sebagai alat deteksi dini terhadap proses degradasi kimia pada beton bertulang yang terpapar lingkungan laut. Untuk analisis lanjutan, disarankan penggunaan metode pendukung seperti XRD dan SEM-EDS guna memastikan identifikasi fase kristalin serta distribusi ion klorida dalam matriks beton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin serta Laboratorium Terpadu Universitas Teuku Umar atas dukungan dan fasilitas yang telah diberikan selama proses penelitian ini berlangsung

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Susanto, J. Supardi, M. Ridha, S. Huzni, and S. Fonna, "Laju Korosi Atmosferik Kawasan Pesisir dan Rural Di Kabupaten Aceh Barat Pasca Tsunami 2004," *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, 2016.
- [2] H. Susanto, S. Huzni, and S. Fonna, "Corrosion of Reinforced Concrete Structures Submerged by the 2004 Tsunami in West Aceh, Indonesia," *Int. J. Corros.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4318434.
- [3] H. Susanto, J. Supardi, and S. Fonna, "Degradation of reinforced concrete corrosion on coast after the 2004 tsunami," *J. Corros. Sci. Eng.*, vol. 22, 2019.
- [4] H. Susanto, M. Ridha, S. Huzni, and S. Fonna, "Korosi Infrastruktur Beton Bertulang Pada Bangunan Terendam Tsunami," in *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XV (SNTTM XV)*, Bandung: Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, 2016, pp. 594–599.
- [5] J. K. Das and B. Pradhan, "Long term effect of corrosion inhibitor and associated cation type of chloride ions on chloride profile of concrete exposed to composite chloride-sulfate environment," *Mater. Today Proc.*, vol. 32, pp. 803–809, 2020.
- [6] F. Qu, H. Zhao, K. Wu, Y. Liu, X. Zhao, and W. Li, "Phase transformation and microstructure of in-situ concrete after 20-year exposure to harsh mining environment: A case study," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, p. e02287, 2023.
- [7] Z. Y. Qu, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, "Relationship between the particle size and dosage of LDHs and concrete resistance against chloride ingress," *Cem. Concr. Res.*, vol. 105, pp. 81–90, 2018.
- [8] D. Law, Y. Patrisia, C. Gunasekara, A. Castel, Q. D. Nguyen, and A. Wardhono, "Durability assessment of alkali-activated concrete exposed to a marine environment," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 35, no. 9, p. 4023275, 2023.
- [9] A. Tiwari, S. Goyal, V. Luxami, M. K. Chakraborty, and G. Prabhakar, "Assessment of corrosion inhibition efficiency of generic compounds having different functional groups in carbonated pore solution with chlorides and migration ability in concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 290, p. 123275, 2021.
- [10] R. Qian, Q. Li, C. Fu, Y. Zhang, Y. Wang, and X. Jin, "Atmospheric chloride-induced corrosion of steel-reinforced concrete beam exposed to real marine-environment for 7 years," *Ocean Eng.*, vol. 286, p. 115675, 2023.
- [11] X. Gao, "Study on the Effect of Ultra-fine Limestone Powder on the Resistance of Cement-slag Powder System to Chloride Ion Permeability," in *Journal of Physics: Conference*

Series, IOP Publishing, 2024, p. 12060.

- [12] L. Tian *et al.*, “Effect of nucleation seeding and triisopropanolamine on the compressive strength, chloride binding capacity and microstructure of cement paste,” *J. Build. Eng.*, vol. 52, p. 104382, 2022.
 - [13] C. Shi, X. Hu, X. Wang, Z. Wu, and G. de Schutter, “Effects of chloride ion binding on microstructure of cement pastes,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 1, p. 4016183, 2017.
 - [14] V. Zhuravel, T. Rucińska, and O. Borziak, “Investigation of the Diffusion of Chloride Ions in Blended Cement Pastes,” *ce/papers*, vol. 6, no. 6, pp. 1265–1268, 2023.
 - [15] M. Sun *et al.*, “Effect of carbonation curing on distribution and binding capacity of chloride ions in cement pastes,” *J. Build. Eng.*, vol. 71, p. 106506, 2023.
 - [16] F. Barberon, V. Baroghel-Bouny, H. Zanni, B. Bresson, L. Malosse, and Z. Gan, “Interactions between chloride and cement-paste materials,” *Magn. Reson. Imaging*, vol. 23, no. 2, pp. 267–272, 2005.
-