

Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin

Volume 3, Nomor 11, December 2025, P. 563-567

E-ISSN: 2986-6340

Licensed by CC BY-SA 4.0

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18339104>

Kajian Bio-Korosi pada Struktur Beton di Lingkungan Industri Kota Lhokseumawe akibat Emisi Senyawa Fosfor

*A Bio-Corrosion Study of Concrete Structures in the Industrial Environment of Lhokseumawe City
Due to Phosphorus Compound Emissions*

Aisyah Protonia Tanjung^{1*}, Lusyana Eka Wardani²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh

*Email korespondensi: aisyahprotoniatanjung@unimal.ac.id

Abstrak

Beton merupakan material konstruksi yang digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki kekuatan tekan tinggi dan ketahanan yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan. Namun, pada lingkungan industri, beton rentan mengalami degradasi akibat proses kimia dan biologis, salah satunya adalah bio-korosi. Bio-korosi terjadi akibat aktivitas mikroorganisme penghasil asam yang menurunkan pH permukaan beton, merusak matriks material, serta mempercepat korosi pada baja tulangan. Kawasan industri, seperti wilayah dengan aktivitas pabrik pupuk dan industri kimia, menghasilkan emisi dan limbah yang mengandung senyawa fosfor yang dapat memengaruhi ketahanan beton. Senyawa fosfor memiliki peran ganda, yaitu dapat mempercepat bio-korosi sebagai sumber nutrisi mikroorganisme, namun pada kondisi tertentu juga berpotensi berfungsi sebagai inhibitor korosi dengan membentuk lapisan pelindung pada baja tulangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif peran senyawa fosfor terhadap bio-korosi beton di lingkungan industri. Metode yang digunakan adalah studi literatur dengan mengkaji berbagai penelitian terdahulu yang membahas mekanisme bio-korosi, aktivitas mikroorganisme, serta pengaruh fosfor terhadap beton dan baja tulangan. Hasil kajian menunjukkan bahwa bio-korosi beton merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi antara faktor biologis, kimia, dan lingkungan. Peran fosfor sangat bergantung pada kondisi lingkungan sekitar beton, sehingga pengelolaan lingkungan industri menjadi faktor penting dalam menjaga ketahanan dan umur layanan struktur beton. Kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam upaya mitigasi kerusakan beton serta pengelolaan infrastruktur yang berkelanjutan di kawasan industri.

Kata kunci: Baja Tulangan, Beton, Bio-korosi, Lingkungan Industri, Senyawa Fosfor

Abstract

Concrete is a construction material widely used in infrastructure development due to its high compressive strength and good resistance to various environmental conditions. However, in industrial environments, concrete is susceptible to degradation caused by chemical and biological processes, one of which is bio-corrosion. Bio-corrosion occurs as a result of the activity of acid-producing microorganisms that lower the pH of the concrete surface, damage the material matrix, and accelerate corrosion of the reinforcing steel. Industrial areas, such as regions with fertilizer plants and chemical industries, generate emissions and waste containing phosphorus compounds that can affect the durability of concrete. Phosphorus compounds play a dual role: they can accelerate bio-corrosion by serving as a nutrient source for microorganisms, yet under certain conditions they may also act as corrosion inhibitors by forming protective layers on reinforcing steel. This study aims to comprehensively examine the role of phosphorus compounds in concrete bio-corrosion within industrial environments. The method employed is a literature review that analyzes previous studies addressing bio-corrosion mechanisms, microbial activity, and the influence of phosphorus on concrete and reinforcing steel. The results indicate that concrete bio-corrosion is a complex phenomenon influenced by interactions among biological, chemical, and environmental factors. The role of phosphorus is highly dependent on the surrounding environmental conditions of the concrete; therefore, effective industrial environmental management is a crucial factor in maintaining the durability and service life of concrete structures. This review is expected to provide a scientific basis for mitigating concrete deterioration and supporting sustainable infrastructure management in industrial areas.

Keywords: Reinforcing Steel; Concrete; Bio-Corrosion; Industrial Environment; Phosphorus Compounds

Article Info

Received date: 25 November 2025

Revised date: 30 November 2025

Accepted date: 18 December 2025

PENDAHULUAN

Beton merupakan material utama yang paling luas digunakan dalam pembangunan infrastruktur, khususnya pada konstruksi bangunan, jalan, jembatan, serta fasilitas industri. Keunggulan beton terletak pada kemampuannya menahan beban tekan yang tinggi, stabilitas struktural yang baik, serta ketahanannya terhadap berbagai kondisi lingkungan. Oleh karena itu, beton sering dianggap sebagai material yang kuat dan berumur panjang. Namun demikian, meskipun memiliki ketahanan fisik yang baik, beton tidak sepenuhnya kebal terhadap proses degradasi kimia dan biologis yang dapat menurunkan kinerja serta umur layan struktur (Dewi & Suandi, 2021).

Salah satu permasalahan yang semakin banyak ditemukan pada struktur beton adalah bio-korosi, yaitu proses kerusakan material yang dipicu oleh aktivitas mikroorganisme (Chaudhari et al., 2022). Mikroorganisme tertentu mampu menghasilkan senyawa asam sebagai produk metabolisme yang dapat menurunkan pH pada permukaan beton. Penurunan pH ini berpotensi merusak matriks beton dan mempercepat terjadinya korosi pada baja tulangan di dalam struktur. Bio-korosi menjadi ancaman serius terutama pada lingkungan dengan tingkat kelembapan tinggi, sirkulasi udara terbatas, serta keberadaan polutan kimia, seperti pada kawasan industri dan fasilitas pengolahan limbah (Fajrina & Zaki, 2024).

Kawasan industri memiliki karakteristik lingkungan yang kompleks akibat aktivitas manufaktur dan proses kimia yang berlangsung secara intensif. Di wilayah industri seperti Lhokseumawe, keberadaan pabrik pupuk dan industri kimia menghasilkan emisi gas serta limbah cair yang mengandung berbagai senyawa anorganik, termasuk fosfor. Senyawa fosfor ini memiliki peran yang bersifat ambivalen terhadap struktur beton. Di satu sisi, fosfor dapat mempercepat proses bio-korosi karena berfungsi sebagai sumber nutrisi bagi mikroorganisme penghasil asam yang berkontribusi terhadap degradasi beton. Kondisi ini dapat meningkatkan laju kerusakan material dan menurunkan daya tahan struktur dalam jangka panjang (Saugi, 2021).

Namun di sisi lain, fosfor juga dilaporkan memiliki potensi sebagai inhibitor korosi pada baja tulangan. Dalam kondisi kimia tertentu, fosfor dapat bereaksi dengan ion besi dan membentuk lapisan pelindung berupa *ferrous phosphate* ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$) pada permukaan baja. Lapisan ini berfungsi sebagai penghambat proses oksidasi, sehingga dapat memperlambat laju korosi baja tulangan di dalam beton. Fenomena ini menunjukkan bahwa keberadaan fosfor di lingkungan industri tidak selalu bersifat merugikan, melainkan dapat memberikan efek perlindungan tergantung pada keseimbangan kondisi kimia, biologis, dan lingkungan sekitarnya (Anjani & Walujodjati, 2022; Tanjung et al., 2024).

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan kajian yang komprehensif untuk memahami peran ganda fosfor terhadap bio-korosi beton, khususnya pada struktur yang berada di kawasan industri. Pemahaman mengenai interaksi antara aktivitas mikroorganisme, senyawa fosfor, beton, dan baja tulangan menjadi penting sebagai dasar dalam upaya mitigasi kerusakan struktur dan peningkatan umur layanan beton. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengelolaan infrastruktur beton yang lebih berkelanjutan di lingkungan industri.

METODE

Identifikasi dan penyaringan literatur

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur untuk mengkaji fenomena bio-korosi pada beton serta pengaruh senyawa fosfor terhadap ketahanan beton dan baja tulangan di lingkungan industri. Metode studi literatur dipilih karena mampu memberikan gambaran menyeluruh berdasarkan hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan, sehingga dapat digunakan untuk menganalisis permasalahan secara sistematis dan berbasis data ilmiah.

Tahapan penelitian diawali dengan proses identifikasi literatur yang berkaitan dengan bio-korosi beton, aktivitas mikroorganisme pada material konstruksi, pengaruh senyawa fosfor dan fosfat terhadap beton dan baja tulangan, serta studi pada kawasan industri. Sumber literatur diperoleh dari jurnal ilmiah nasional dan internasional, prosiding, serta buku referensi yang diakses melalui basis data ilmiah seperti *Google Scholar* dan portal jurnal terakreditasi. Literatur yang digunakan diprioritaskan berasal dari publikasi yang relevan dan memiliki keterkaitan langsung dengan topik penelitian.

Meringkas dan melaporkan temuan

Selanjutnya, dilakukan proses penyaringan literatur dengan membaca judul, abstrak, dan isi artikel secara cermat. Kriteria inklusi meliputi artikel yang membahas mekanisme bio-korosi beton, faktor lingkungan yang mempengaruhi degradasi beton, serta peran fosfor baik sebagai pemicu aktivitas mikroorganisme maupun sebagai inhibitor korosi pada baja tulangan. Literatur yang tidak relevan dengan fokus penelitian atau tidak memiliki kejelasan metodologi dikeluarkan dari analisis.

Literatur yang telah terseleksi kemudian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi pola, hubungan sebab-akibat, serta perbedaan temuan antar penelitian. Analisis difokuskan pada mekanisme terjadinya bio-korosi, kondisi lingkungan yang mempengaruhi laju kerusakan beton, serta efek ganda senyawa fosfor terhadap degradasi maupun perlindungan struktur beton. Hasil analisis tersebut disintesis untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai permasalahan yang dikaji.

Tahap akhir penelitian dilakukan dengan menarik kesimpulan berdasarkan hasil sintesis literatur dan merumuskan implikasi ilmiah yang dapat digunakan sebagai dasar pengelolaan dan perlindungan struktur beton di kawasan industri. Metode studi literatur ini diharapkan mampu memberikan landasan teoritis yang kuat serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan di bidang material dan infrastruktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bio-korosi Beton pada Lingkungan Industri

Bio-korosi merupakan salah satu mekanisme degradasi beton yang dominan pada struktur yang berada di lingkungan industri. Bio-korosi terjadi akibat aktivitas mikroorganisme, khususnya bakteri penghasil asam, yang tumbuh pada permukaan beton dengan kondisi kelembapan tinggi dan paparan polutan kimia. Mikroorganisme tersebut menghasilkan asam organik dan anorganik yang menyebabkan penurunan pH permukaan beton, sehingga mempercepat pelarutan senyawa kalsium pada matriks beton (Patah et al., 2023).

Penurunan pH ini berdampak langsung terhadap stabilitas struktur beton dan mempercepat terjadinya korosi pada baja tulangan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa lingkungan industri dengan emisi kimia dan limbah cair memiliki tingkat bio-korosi yang lebih tinggi dibandingkan lingkungan non-industri. Kondisi ini menjadikan bio-korosi sebagai salah satu faktor utama yang menurunkan umur layanan struktur beton di kawasan industri (Irwan et al., 2024).

Peran Mikroorganisme dalam Proses Bio-korosi Beton

Mikroorganisme berperan penting dalam mempercepat degradasi beton melalui proses metabolisme yang menghasilkan senyawa asam. Bakteri seperti *sulfur-oxidizing bacteria* dan *acid-producing bacteria* banyak ditemukan pada permukaan beton di lingkungan lembap dan tercemar seperti penjelasan pada Gambar 1. Keberadaan mikroorganisme ini menyebabkan perubahan kimia permukaan beton yang signifikan, terutama dalam menurunkan pH dan meningkatkan porositas beton.



Gambar 1. Proses Bio-korosi pada Beton

Peningkatan porositas beton akibat bio-korosi membuka jalur difusi bagi ion agresif menuju bagian dalam struktur, termasuk baja tulangan (Dasar et al., 2023). Kondisi ini mempercepat terjadinya korosi baja dan menurunkan kekuatan mekanis beton secara keseluruhan. Proses ini menunjukkan bahwa bio-korosi tidak hanya berdampak pada permukaan beton, tetapi juga mempengaruhi kinerja struktural secara menyeluruh.

Pengaruh Senyawa Fosfor terhadap Bio-korosi Beton

Senyawa fosfor memiliki peran ganda terhadap bio-korosi beton. Di satu sisi, fosfor dapat berperan sebagai sumber nutrisi bagi mikroorganisme, sehingga meningkatkan pertumbuhan dan aktivitas bakteri penghasil asam. Kondisi ini berpotensi mempercepat laju bio-korosi pada permukaan beton, terutama pada lingkungan dengan kelembapan tinggi dan sirkulasi udara yang terbatas (Rahayu & Puspito, 2017).

Namun di sisi lain, fosfor juga dilaporkan memiliki potensi sebagai inhibitor korosi pada baja tulangan. Dalam kondisi tertentu, fosfor dapat bereaksi dengan ion besi dan membentuk lapisan pelindung berupa *ferrous phosphate* ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$). Lapisan ini mampu menghambat kontak langsung antara baja tulangan dan lingkungan agresif, sehingga memperlambat laju korosi. Fenomena ini menunjukkan bahwa pengaruh fosfor sangat bergantung pada kondisi kimia dan biologis lingkungan sekitar beton (Rosidah et al., 2022).

Interaksi Fosfor, Beton, dan Baja Tulangan

Interaksi antara beton, senyawa fosfor, dan baja tulangan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti pH, kelembapan, konsentrasi fosfor, dan aktivitas mikroorganisme. Pada kondisi lingkungan yang didominasi oleh aktivitas biologis, fosfor cenderung berperan sebagai pemicu bio-korosi. Sebaliknya, pada kondisi kimia yang lebih stabil, fosfor berpotensi memberikan efek protektif terhadap baja tulangan (Widari, 2023). Ringkasan pengaruh fosfor terhadap beton dan baja tulangan berdasarkan studi literatur disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengaruh Senyawa Fosfor terhadap Beton dan Baja Tulangan

No	Kondisi Lingkungan	Peran Fosfor	Dampak terhadap Beton
1.	Kelembapan tinggi, aktivitas mikroba	Nutrisi mikroorganisme	Mempercepat bio-korosi beton
2.	Lingkungan kimia stabil	Inhibitor korosi	Menghambat korosi baja tulangan
3.	Paparan limbah industri	Efek ganda	Degradasi beton atau perlindungan baja

Interaksi Fosfor, Beton, dan Baja Tulangan

Hasil menunjukkan bahwa bio-korosi beton merupakan fenomena kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi antara faktor biologis dan kimia. Peran ganda fosfor menegaskan bahwa pengelolaan lingkungan industri menjadi aspek penting dalam menjaga ketahanan struktur beton (Hardianti et al., 2017). Tanpa pengelolaan yang tepat, fosfor dapat mempercepat degradasi beton, namun dengan pengendalian kondisi lingkungan, fosfor berpotensi dimanfaatkan sebagai agen penghambat korosi.

Pembahasan ini menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner dalam perencanaan dan pemeliharaan struktur beton di kawasan industri, dengan mempertimbangkan aspek material, lingkungan, dan biologi secara terintegrasi.

SIMPULAN

Bio-korosi merupakan faktor penting yang berkontribusi terhadap degradasi struktur beton, terutama pada lingkungan industri yang memiliki tingkat kelembapan tinggi dan paparan senyawa kimia. Aktivitas mikroorganisme penghasil asam terbukti berperan dalam menurunkan pH beton, meningkatkan porositas material, dan mempercepat korosi pada baja tulangan sehingga menurunkan ketahanan serta umur layanan struktur. Senyawa fosfor memiliki karakteristik peran ganda, yaitu berpotensi mempercepat bio-korosi sebagai sumber nutrisi mikroorganisme, namun dalam kondisi kimia tertentu juga mampu bertindak sebagai inhibitor korosi melalui pembentukan lapisan pelindung pada baja tulangan. Temuan ini menegaskan bahwa ketahanan beton di kawasan industri

sangat dipengaruhi oleh interaksi antara faktor biologis, kimia, dan lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif terhadap mekanisme bio-korosi dan peran senyawa fosfor menjadi landasan penting dalam perencanaan, pengelolaan, dan pemeliharaan struktur beton yang berkelanjutan.

SARAN

Diperlukan penelitian lanjutan berbasis eksperimental untuk mengkaji secara kuantitatif pengaruh senyawa fosfor terhadap laju bio-korosi beton dan korosi baja tulangan. Selain itu, pengembangan strategi mitigasi dan pengelolaan lingkungan industri yang terintegrasi disarankan guna meningkatkan ketahanan serta umur layanan struktur beton secara berkelanjutan.

REFERENSI

- Anjani, W. S., & Walujodjati, E. (2022). Pengaruh Korosi Tulangan Terhadap Panjang Penyaluran pada Beton. *Jurnal Konstruksi*, 20(2), 311-320. <https://doi.org/https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.20-2.1214>
- Chaudhari, B., Panda, B., Šavija, B., & Chandra Paul, S. (2022). Microbiologically induced concrete corrosion: a concise review of assessment methods, effects, and corrosion-resistant coating materials. *Materials*, 15(12), 4279. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15124279>
- Dasar, A., Patah, D., Sainuddin, S., & Caronge, M. A. (2023). Ketahanan Korosi Baja Tulangan dalam Beton menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Air Laut. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29(2), 243-252. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/mkts.v29i2.55191>
- Dewi, S. U., & Suandi, A. (2021). Analisa Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Profil Baja Ringan sebagai Tulangan. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 6(1), 24-34. <https://doi.org/https://doi.org/10.24912/jmstkik.v3i2.5958>
- Fajrina, N., & Zaki, A. (2024). Eksposure Condition Pada Self-Healing Beton Yang Korosi Menggunakan NDT Method: Analisis Bibliometric. *Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain*, 2(1), 40-45. <https://doi.org/https://doi.org/10.25077/jbkd.2.1.40-45.2024>
- Hardianti, H., Kristiawan, S. A., & Wibowo, W. (2017). Pengaruh Konsentrasi Klorida Terhadap Laju Penetrasi Ion Klorida Ke Dalam Beton High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC). *Matriks Teknik Sipil*, 5(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.20961/mateksi.v5i3.36727>
- Irwan, I., Zaini, H., Nurlaili, N., & Harunsyah, H. (2024). Pemanfaatan Antibiotik Amoxicilin Kadaluaarsa Sebagai Inhibitor Korosi Ramah Lingkungan Pada Baja Karbon Dalam Lingkungan Air Laut. Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe,
- Patah, D., Dasar, A., & Nurdin, A. (2023). Nilai Ambang Klorida Untuk Inisiasi Korosi Pada Beton Bertulang Menggunakan Abu Terbang. *BANDAR: JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING*, 5(2), 29-38. <https://doi.org/https://doi.org/10.31605/bjce.v5i2.3024>
- Rahayu, D. S., & Puspito, M. J. (2017). Kajian analisis pertumbuhan bakteri penyebab bio-korosi di kolam penyimpanan bahan bakar nuklir bekas. Proceedings of the Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV Tahun, Depok, Indonesia,
- Rosidah, A. A., Setyowati, V. A., & Amin, N. (2022). Pengaruh Variasi Molaritas dan Jenis Inhibitor terhadap Ketahanan Korosi dan Morfologi Baja Tulangan Beton. Prosiding SENASTITAN: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan.
- Saugi, W. (2021). Pengaruh Faktor Fisik, Kimia, dan Biologi Medium Terhadap Laju Korosi Besi. *Borneo Journal of Science and Mathematics Education*, 1(1), 29-55.
- Tanjung, A. P., Yin, K., Zhao, L., Wu, J.-Z., Wang, A.-J., Mei, L.-P., Song, P., & Feng, J.-J. (2024). Target-regulated photoactivities of CdS/Ni-MOF heterojunction with [Ru (bpy) 2dppz] 2+ intercalator: a bisphenol A photoelectrochemical aptasensor. *Microchimica Acta*, 191(3), 139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00604-024-06230-6>
- Widari, N. S. (2023). Efektivitas Pemakaian Inhibitor Campuran Senyawa Nitrit-Phosphat Terhadap Ketahanan Korosi Logam Stainless Steel 304 Pada Air Laut. *Journal of Research and Technology*, 9(2), 109-117. <https://doi.org/https://doi.org/10.55732/jrt.v9i2.993>