

Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin
Volume 3, Nomor 12, January 2026, P. 711-715
E-ISSN: 2986-6340
Licensed by CC BY-SA 4.0
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18339342>

Kajian Mekanisme *Sulfat Attack* pada Struktur Beton terhadap Dampak Siklus Sulfur terhadap *Durability* Infrastruktur

Study of Sulfate Attack Mechanisms on Concrete Structures: Effects of Sulfur Cycles on Infrastructure Durability

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

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

*Email korespondensi: aisyahprotoniatanjung@unimal.ac.id

Abstrak

Sulfat attack merupakan salah satu mekanisme degradasi kimia beton yang signifikan, terutama pada struktur yang berada di lingkungan industri. Proses ini terjadi akibat reaksi antara ion sulfat dan senyawa hidrat semen, seperti kalsium hidroksida dan kalsium aluminat, yang menghasilkan produk ekspansif berupa *ettringite* dan *gypsum*. Pembentukan senyawa tersebut menyebabkan pengembangan volume, retak, penurunan kekuatan, serta degradasi bertahap pada struktur beton. Lingkungan industri memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap *sulfat attack* akibat aktivitas produksi yang menghasilkan emisi dan limbah cair yang mengandung senyawa sulfur. Senyawa sulfur tersebut mengalami transformasi melalui siklus sulfur di lingkungan, sehingga meningkatkan ketersediaan ion sulfat yang bersifat agresif terhadap beton. Paparan sulfat yang berlangsung secara terus-menerus berdampak signifikan terhadap *durability* atau ketahanan infrastruktur beton, yang ditandai dengan peningkatan porositas, permeabilitas, serta penurunan umur layanan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji mekanisme *sulfat attack* pada struktur beton serta keterkaitannya dengan siklus sulfur terhadap *durability* infrastruktur. Metode yang digunakan adalah scoping review dengan menelaah literatur ilmiah dari basis data bereputasi dan jurnal terindeks nasional. Hasil kajian menunjukkan bahwa tingkat keparahan *sulfat attack* dipengaruhi oleh konsentrasi ion sulfat, kondisi lingkungan, dan karakteristik beton. Pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme ini menjadi dasar penting dalam perencanaan, pengelolaan, dan pemeliharaan infrastruktur beton yang berkelanjutan di lingkungan industri.

Kata kunci: *Durability Beton, Lingkungan Industri, Siklus Sulfur, Sulfat Attack, Struktur Beton*

Abstract

Sulfate attack is a significant chemical degradation mechanism in concrete, particularly for structures located in industrial environments. This process occurs due to reactions between sulfate ions and hydrated cement compounds, such as calcium hydroxide and calcium aluminate, producing expansive products like ettringite and gypsum. The formation of these compounds causes volumetric expansion, cracking, strength reduction, and progressive deterioration of concrete structures. Industrial environments are highly susceptible to sulfate attack due to production activities that generate emissions and wastewater containing sulfur compounds. These sulfur compounds undergo transformation through the environmental sulfur cycle, increasing the availability of aggressive sulfate ions that attack concrete. Continuous sulfate exposure has a significant impact on the durability of concrete infrastructure, characterized by increased porosity and permeability, as well as a reduced service life of structures. This study aims to examine the mechanisms of sulfate attack on concrete structures and its relationship with the sulfur cycle in influencing infrastructure durability. The method employed is a scoping review, analyzing scientific literature from reputable databases and nationally indexed journals. The results indicate that the severity of sulfate attack is influenced by sulfate ion concentration, environmental conditions, and concrete characteristics. A comprehensive understanding of this mechanism provides a critical foundation for the planning, management, and maintenance of sustainable concrete infrastructure in industrial environments.

Keywords: *Concrete Durability; Industrial Environment; Sulfur Cycle; Sulfate Attack; Concrete Structures*

Article Info

Received date: 12 January 2026

Revised date: 18 January 2026

Accepted date: 22 January 2026

PENDAHULUAN

Sulfat attack merupakan mekanisme kerusakan beton yang terjadi akibat reaksi antara ion sulfat dengan senyawa hidrat semen, seperti kalsium hidroksida dan kalsium aluminat. Reaksi ini

menghasilkan produk ekspansif, seperti *ettringite* dan *gypsum*, yang dapat menyebabkan pengembangan volume, retak, penurunan kekuatan, serta kerusakan struktural beton. Dalam jangka panjang, proses ini berdampak langsung terhadap *durability* atau ketahanan beton, khususnya pada struktur yang berada di lingkungan dengan paparan sulfat tinggi (Cahyani et al., 2020).

Lingkungan industri memiliki karakteristik yang rentan terhadap terjadinya *sulfat attack* akibat aktivitas produksi dan proses kimia yang menghasilkan emisi gas serta limbah cair yang mengandung senyawa sulfur. Senyawa sulfur tersebut dapat mengalami transformasi melalui siklus sulfur di lingkungan, membentuk senyawa sulfat yang bersifat agresif terhadap beton. Proses siklus sulfur yang melibatkan reaksi kimia dan biologis di udara, tanah, dan air berpotensi meningkatkan konsentrasi ion sulfat yang berinteraksi langsung dengan struktur beton (Utami et al., 2023).

Paparan sulfat yang berlangsung secara terus-menerus menyebabkan beton mengalami degradasi bertahap yang sulit terdeteksi pada tahap awal, namun berdampak signifikan terhadap kinerja struktural dalam jangka panjang. Kerusakan akibat *sulfat attack* tidak hanya mempengaruhi matriks beton, tetapi juga dapat mempercepat degradasi pada elemen struktural lainnya, sehingga menurunkan tingkat keamanan dan umur layanan infrastruktur (Vyšvařil et al., 2015). Oleh karena itu, pemahaman mengenai mekanisme *sulfat attack* dan keterkaitannya dengan siklus sulfur menjadi aspek penting dalam upaya menjaga *durability* infrastruktur beton (Cahyani et al., 2020; Hidayatun et al., 2025; Walenna et al., 2025).

Berdasarkan kondisi tersebut, kajian mengenai mekanisme *sulfat attack* pada struktur beton terhadap dampak siklus sulfur terhadap *durability* infrastruktur menjadi sangat relevan untuk dilakukan. Kajian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai proses degradasi beton akibat paparan sulfat serta implikasinya terhadap ketahanan infrastruktur. Hasil kajian diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam perencanaan, pengelolaan, dan pemeliharaan struktur beton yang lebih berkelanjutan, khususnya pada lingkungan industri.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *scoping review* untuk mengkaji mekanisme sulfat attack pada struktur beton serta dampak siklus sulfur terhadap *durability* infrastruktur. Proses *scoping review* dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu identifikasi literatur, penyaringan, penetapan kriteria *exclusion*, dan tahap akhir berupa analisis literatur terpilih. Penulis menggunakan berbagai basis data ilmiah dalam proses identifikasi literatur, antara lain Scopus, *Web of Science* (WoS), Sinta, serta artikel relevan lainnya yang berkaitan dengan degradasi beton akibat sulfat dan siklus sulfur di lingkungan industri. Artikel yang terindeks dalam Scopus dan WoS diprioritaskan karena diakui memiliki kualitas proses *peer review* yang baik.

Proses identifikasi hingga penggunaan artikel dilakukan dengan mengacu pada pendekatan *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses* (PRISMA). Pendekatan PRISMA digunakan untuk memastikan proses penelusuran dan seleksi literatur dilakukan secara sistematis dan transparan. Dalam kajian ini, artikel penelitian digunakan untuk melihat perkembangan pemahaman mengenai mekanisme sulfat attack, reaksi kimia sulfat pada beton, serta keterkaitannya dengan siklus sulfur di lingkungan industri. Pada tahap awal, penulis melakukan pemeriksaan awal terhadap artikel yang diperoleh, meliputi judul, penulis, jurnal, dan tahun terbit. Selanjutnya, penulis membaca judul dan abstrak secara cermat untuk menilai kesesuaian artikel dengan fokus kajian.

Kriteria *exclusion* yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi artikel yang berupa makalah tinjauan (*review*), artikel yang tidak membahas mekanisme *sulfat attack* pada beton, serta artikel yang tidak memiliki keterkaitan dengan siklus sulfur atau lingkungan industri. Artikel yang tidak relevan dengan tujuan penelitian atau tidak memiliki kejelasan metodologi juga dikeluarkan dari analisis. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi pola mekanisme degradasi beton, faktor lingkungan yang mempengaruhi laju *sulfat attack*, serta dampaknya terhadap *durability* infrastruktur. Hasil analisis tersebut diringkas dan disintesis untuk menjawab tujuan penelitian dan memberikan gambaran komprehensif mengenai permasalahan yang dikaji.

HASIL DAN PEMBAHASAN

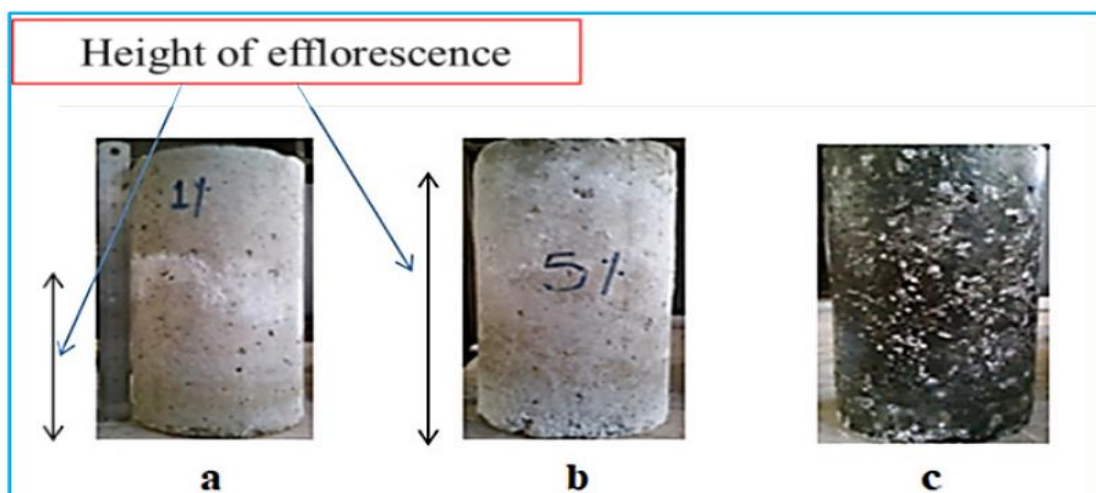
Mekanisme *Sulfat Attack* pada Struktur Beton

Sulfat attack merupakan salah satu bentuk degradasi kimia beton yang terjadi akibat reaksi antara ion sulfat dengan senyawa hidrat semen. Ion sulfat yang berasal dari lingkungan bereaksi dengan kalsium hidroksida dan kalsium aluminat dalam beton, menghasilkan produk reaksi seperti *gypsum* dan *ettringite*. Pembentukan senyawa ini bersifat ekspansif sehingga menyebabkan pengembangan volume pada matriks beton (Zhang et al., 2024).

Pengembangan volume tersebut menimbulkan tegangan internal yang memicu terbentuknya retak mikro hingga retak makro pada beton. Dalam jangka panjang, retakan ini mempercepat penetrasi ion agresif lainnya ke dalam struktur beton dan menurunkan kekuatan serta integritas struktural beton secara keseluruhan. Mekanisme ini menjadikan *sulfat attack* sebagai salah satu faktor utama penurunan *durability* struktur beton di lingkungan agresif (Utami et al., 2023).

Peran Siklus Sulfur dalam Paparan Sulfat

Siklus sulfur di lingkungan berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan ion sulfat yang bersifat agresif terhadap beton (Santos et al., 2025). Aktivitas industri menghasilkan emisi gas yang mengandung senyawa sulfur, seperti sulfur dioksida, yang dapat mengalami oksidasi dan bereaksi dengan uap air di atmosfer membentuk senyawa sulfat. Senyawa ini kemudian terdeposisi ke permukaan tanah, air, dan struktur beton melalui proses deposisi basah maupun kering (Zhao et al., 2018).



Gambar 1. Hasil inspeksi visual spesimen silinder beton setelah perendaman dalam larutan natrium sulfat: beton tanpa pelapisan yang direndam dalam larutan Na_2SO_4 1% (a), beton tanpa pelapisan yang direndam dalam larutan Na_2SO_4 5% (b), dan beton dengan pelapisan bitumen yang direndam dalam larutan Na_2SO_4 5% (c) (Nassar et al., 2021).

Di lingkungan industri, siklus sulfur tidak hanya melibatkan proses kimia, tetapi juga proses biologis yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme (Tanjung et al., 2024). Transformasi sulfur menjadi sulfat yang larut dalam air meningkatkan peluang terjadinya kontak langsung antara ion sulfat dan struktur beton (Ji & Liu, 2024). Kondisi ini mempercepat proses *sulfat attack*, terutama pada struktur yang terpapar secara terus-menerus yang dapat terlihat pada Gambar 1.

Dampak *Sulfat Attack* terhadap *Durability* Infrastruktur

Sulfat attack berdampak signifikan terhadap *durability* infrastruktur beton. Kerusakan yang ditimbulkan tidak hanya berupa penurunan kekuatan mekanis, tetapi juga peningkatan porositas dan permeabilitas beton. Peningkatan porositas mempercepat difusi zat agresif ke dalam beton, sehingga mempercepat degradasi material dan memperpendek umur layanan struktur (Nassar et al., 2021).

Struktur beton yang mengalami *sulfat attack* dalam jangka panjang berpotensi mengalami kegagalan fungsi, terutama pada infrastruktur yang menuntut keandalan tinggi seperti bangunan industri, saluran drainase, dan fasilitas utilitas (Zarzar Júnior & de Oliveira, 2016). Oleh karena itu, pemahaman terhadap mekanisme *sulfat attack* dan keterkaitannya dengan siklus sulfur menjadi penting dalam upaya menjaga *durability* infrastruktur.

Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi *Sulfat Attack*

Laju dan tingkat keparahan *sulfat attack* dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, antara lain konsentrasi ion sulfat, kelembapan, suhu, dan karakteristik beton itu sendiri (Yao et al., 2023). Lingkungan industri dengan paparan limbah cair dan emisi gas sulfur memiliki risiko lebih tinggi terhadap terjadinya *sulfat attack*. Selain itu, beton dengan porositas tinggi dan kualitas material yang rendah cenderung lebih rentan terhadap serangan sulfat.

Tabel 1. Faktor Lingkungan dan Dampaknya terhadap *Sulfat Attack* pada Beton

No	Nama	Keterangan
1.	Konsentrasi ion sulfat tinggi	Mempercepat reaksi kimia sulfat
2.	Kelembapan tinggi	Meningkatkan penetrasi sulfat
3.	Paparan limbah industri	Mempercepat degradasi beton
4.	Porositas beton tinggi	Menurunkan <i>durability</i> beton

Implikasi terhadap Pengelolaan Infrastruktur Beton

Sulfat attack merupakan fenomena degradasi beton yang kompleks dan dipengaruhi oleh interaksi antara faktor kimia dan lingkungan. Peran siklus sulfur menegaskan bahwa pengelolaan emisi dan limbah industri menjadi aspek penting dalam upaya perlindungan struktur beton (Liu et al., 2020; Zarzar Júnior & de Oliveira, 2016). Tanpa pengendalian yang tepat, paparan sulfat dapat mempercepat degradasi beton dan menurunkan *durability* infrastruktur (Omrani et al., 2023).

Pendekatan pengelolaan infrastruktur beton di lingkungan industri perlu mempertimbangkan pemilihan material yang tahan terhadap sulfat, pengendalian kondisi lingkungan, serta penerapan strategi pemeliharaan yang berkelanjutan dan terencana. Upaya tersebut diharapkan mampu memperpanjang umur layanan struktur beton, menjaga kinerja struktural, serta mengurangi risiko kerusakan dini pada infrastruktur di kawasan industri.

SIMPULAN

Sulfat attack merupakan mekanisme degradasi kimia beton yang terjadi akibat reaksi antara ion sulfat dan senyawa hidrat semen, menghasilkan produk ekspansif seperti ettringite dan *gypsum* yang menyebabkan pengembangan volume, retak, serta penurunan kekuatan beton. Di lingkungan industri, siklus sulfur berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan ion sulfat melalui transformasi senyawa sulfur hasil emisi dan limbah industri, sehingga mempercepat terjadinya *sulfat attack* pada struktur beton. Paparan sulfat yang berlangsung secara berkelanjutan berdampak signifikan terhadap *durability* infrastruktur beton, ditandai dengan meningkatnya porositas dan permeabilitas beton serta penurunan umur layanan struktur. Tingkat keparahan kerusakan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan, seperti konsentrasi ion sulfat, kelembapan, dan karakteristik beton itu sendiri. Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme *sulfat attack* dan keterkaitannya dengan siklus sulfur menjadi dasar penting dalam perencanaan, pengelolaan, dan pemeliharaan infrastruktur beton yang berkelanjutan di lingkungan industri.

SARAN

Penggunaan material beton yang tahan terhadap sulfat perlu dipertimbangkan dalam perencanaan infrastruktur di lingkungan industri. Pengelolaan emisi dan limbah industri secara terpadu juga disarankan untuk mengurangi paparan senyawa sulfur terhadap struktur beton, serta penerapan monitoring dan pemeliharaan berkala guna mendeteksi dini kerusakan akibat *sulfat attack* dan memperpanjang umur layanan infrastruktur beton.

REFERENSI

- Cahyani, R. A. T., Setyono, E., & Rusdianto, Y. (2020). Performa Beton Dengan Ground Granulated Blast Furnace Slag Terhadap Sulfate Attack. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 16(3), 185-193. <https://doi.org/https://doi.org/10.25077/jrs.16.3.185-193.2020>
- Hidayatun, V., Olivia, M., & Wibisono, G. (2025). EFISIENSI SELF-HEALING MORTAR DENGAN ABU CANGKANG KERANG LOKAN DAN SILICA FUME TERHADAP

- PAPARAN ASAM SULFAT. Prosiding Seminar Nasional Inovasi, Riset, dan Teknologi (SINERGI),
- Ji, L., & Liu, Q. F. (2024). Mass Transfer and Chemical Reaction in Concrete Subjected to Chloride–Sulfate Attack and Calcium Leaching: A Numerical Study [Article]. *Kuei Suan Jen Hsueh Pao/Journal of the Chinese Ceramic Society*, 52(5), 1486-1498. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20230770>
- Liu, F., You, Z., Diab, A., Liu, Z., Zhang, C., & Guo, S. (2020). External sulfate attack on concrete under combined effects of flexural fatigue loading and drying-wetting cycles [Article]. *Construction and Building Materials*, 249, Article 118224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118224>
- Nassar, R. U. D., Aysha, T., Abbas, S., & Saeed, D. (2021). Effect of initial cracking and bitumen coating on performance of concrete in sulfate environment [Article]. *Civil Engineering and Architecture*, 9(6), 1846-1853. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090617>
- Omran, I. A. N., Koniorczyk, M., & Bednarska, D. (2023). Toward distinguishing the chemical, physical, and wetting-drying sulfate attack on concrete. Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems - Proceedings of the 8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2023,
- Santos, H. R. D., Sales, R. B. C., Silva, A. P., Chahud, E., & Aguilar, M. T. P. (2025). Study of the Electrical Resistivity of Concrete Submitted to the Internal and External Action of Sulfates. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,
- 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>
- Utami, N. M., Baihaki, M. A., & Nurtanto, D. (2023). Korelasi Kuat Tekan Beton Dan Ketahanan Sulfat Pada Beton Normal Dengan Penambahan Kaolin Sebagai Substitusi Parsial Semen. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 13(1), 173-182.
- Vyšvařil, M., Bayer, P., & Rovnaníková, M. (2015). Microstructural changes of fine-grained concrete exposed to a sulfate attack [Article]. *Materiali in Tehnologije*, 49(6), 883-888. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.138>
- Walenna, M. A., Wang, Z., & Ngezahayo, E. (2025). Utilization of ground granulated blast furnace slag (GGBS) as an environmentally friendly partial replacement for cement to improve cement-bentonite erosion resistance. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 8(2), 324-345.
- Yao, J., Song, H., & Chen, J. (2023). Effect of temperature on damage of mortars with different supplementary cementitious materials (SCMs) under sulfate attack [Article]. *Construction and Building Materials*, 394, Article 132183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132183>
- Zarzar Júnior, F. C., & de Oliveira, R. A. (2016). Behavior of concrete in relation to physical and chemical sulfate attacks in foundation elements [Article]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(22), 6809-6826. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84995451827&partnerID=40&md5=48f573f6fe3f2ad1093c11e2804a43c4>
- Zhang, C., Li, J., Yu, M., Lu, Y., & Liu, S. (2024). Mechanism and Performance Control Methods of Sulfate Attack on Concrete: A Review [Review]. *Materials*, 17(19), Article 4836. <https://doi.org/10.3390/ma17194836>
- Zhao, G., Li, J., Fan, H., Li, L., & Cui, J. (2018). Influence of Chloride-Sulfate Attack on Degradation and Sulfate Diffusion of Cast-in-Situ Concrete Structures Subjected to Wet-Dry Cycles [Article]. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 46(12), 1637-1645 and 1744. <https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.2018.12.004>