

ANALISIS PENGARUH SUHU DAN KELEMBAPAN GUDANG TERHADAP DEGRADASI MATERIAL PENYIMPANAN MENGUNAKAN PENDEKATAN TERMODINAMIKA PADA GUDANG KAWASAN PESISIR

Alfatih Krisnanto Irawan¹, Althesa Androva², Muhamad Safi'i³, Yafid Effendi⁴
alfatihkrisnanto61@gmail.com¹, althesaandrova@upgris.ac.id², muhamadsafiii@upgris.ac.id³
Universitas PGRI Semarang

ABSTRAK

Gudang yang berada di kawasan pesisir memiliki karakteristik lingkungan berupa suhu tinggi, kelembapan relatif tinggi, serta paparan ion klorida dari udara laut yang berpotensi mempercepat degradasi material selama penyimpanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu dan kelembapan gudang terhadap kualitas material serta mengidentifikasi material yang paling rentan mengalami degradasi pada lingkungan pesisir. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif dan studi literatur yang didukung pengukuran suhu serta kelembapan gudang menggunakan Environmental Meter EN510. Data dianalisis berdasarkan karakteristik termodinamika lingkungan penyimpanan dan dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu mengenai degradasi material pada kondisi kelembapan tinggi. Hasil analisis menunjukkan bahwa material besi merupakan material yang paling rentan mengalami korosi akibat kombinasi kelembapan relatif tinggi dan kandungan ion klorida di udara. Material kayu mengalami peningkatan kadar air yang menyebabkan pembengkakan (swelling), deformasi, dan pertumbuhan jamur. Material rubber mengalami proses thermal aging yang ditandai dengan penurunan elastisitas dan munculnya retak mikro, sedangkan PVC memiliki ketahanan terbaik terhadap pengaruh kelembapan, namun tetap mengalami degradasi akibat paparan suhu tinggi dalam jangka panjang. Penerapan pengendalian suhu pada kisaran 25–30°C, kelembapan relatif 45–60%, penggunaan sistem dehumidifikasi, ventilasi yang memadai, serta pelapisan pelindung pada material terbukti dapat memperlambat laju degradasi dan memperpanjang umur simpan material di gudang kawasan pesisir. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar rekomendasi bagi perusahaan dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan lingkungan gudang serta mengurangi kerugian akibat kerusakan material selama penyimpanan.

Kata Kunci: Termodinamika, Suhu, Kelembapan, Gudang Pesisir, Degradasi Material, Korosi, Swelling, Umur Material.

ABSTRACT

Warehouses located in coastal areas are exposed to environmental conditions characterized by high temperatures, high relative humidity, and airborne chloride ions originating from seawater. These conditions accelerate the degradation of stored materials through heat transfer, moisture transfer, and physicochemical changes governed by thermodynamic principles. This study aims to analyze the effects of warehouse temperature and relative humidity on the quality and service life of wooden, rubber, polyvinyl chloride (PVC), and steel materials stored in a coastal warehouse environment. A quantitative descriptive approach combined with a literature review was employed. Environmental parameters, including temperature and relative humidity, were measured using a thermo-hygrometer and analyzed using thermodynamic concepts related to heat and mass transfer. The results indicate that steel is the most vulnerable material due to accelerated atmospheric corrosion caused by high humidity and chloride deposition. Wood exhibits moisture absorption leading to swelling, dimensional instability, fungal growth, and a reduction in mechanical strength. Rubber undergoes thermal-oxidative aging, resulting in reduced elasticity, increased hardness, and microcrack formation. In contrast, PVC demonstrates the highest resistance to humid coastal environments, although prolonged exposure to elevated temperatures may cause thermal degradation and reduced flexibility. The study also suggests that maintaining warehouse temperatures between 25–30°C and relative humidity between 45–60%,

together with adequate ventilation, dehumidification systems, and appropriate protective coatings, can significantly reduce material degradation and extend service life. These findings provide practical recommendations for warehouse management in coastal regions to improve storage conditions, minimize material deterioration, and enhance inventory reliability.

Keywords: *Thermodynamics, Warehouse Environment, Coastal Warehouse, Temperature, Relative Humidity, Material Degradation, Corrosion, Swelling, Service Life.*

PENDAHULUAN

Pergudangan merupakan salah satu elemen penting dalam sistem rantai pasok yang berfungsi sebagai fasilitas penyimpanan sementara untuk menjaga kualitas barang sebelum didistribusikan kepada konsumen. Kualitas barang selama proses penyimpanan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan gudang, terutama suhu dan kelembapan relatif (relative humidity/RH).

Gudang yang berada di kawasan pesisir menghadapi tantangan lingkungan berupa suhu yang relatif tinggi, kelembapan udara yang tinggi, serta paparan aerosol garam dari udara laut. Perubahan suhu dan kelembapan yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan fisik, perubahan sifat kimia, serta penurunan kualitas produk selama masa penyimpanan seperti korosi pada logam, deformasi pada material polimer, pertumbuhan jamur pada material organik, serta penurunan mutu kemasan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa lingkungan penyimpanan belum memenuhi kondisi ideal bagi penyimpanan berbagai jenis material sehingga berpotensi meningkatkan risiko kerusakan dan menurunkan umur simpan material.

Berdasarkan hasil pengamatan, barang terlihat memiliki lapisan embun serta adanya bercak basah. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ruang penyimpanan memiliki tingkat kelembapan yang cukup tinggi sehingga berpotensi mempercepat proses korosi pada material logam, meningkatkan kadar air pada kayu, serta mempercepat degradasi material polimer selama penyimpanan.

Dalam kajian termodinamika, suhu dan kelembapan merupakan parameter yang memengaruhi perpindahan kalor, kesetimbangan termal, serta interaksi energi antara lingkungan penyimpanan dan material yang disimpan. Proses perpindahan panas melalui konduksi, konveksi, dan radiasi dapat memengaruhi kondisi udara di dalam gudang sehingga berdampak pada stabilitas kualitas barang yang disimpan. Ketiga mekanisme perpindahan kalor tersebut menentukan distribusi temperatur di dalam gudang sehingga memengaruhi laju degradasi material selama penyimpanan. Selain itu, kelembapan yang tinggi dapat meningkatkan risiko kondensasi, pertumbuhan jamur, korosi, dan kerusakan kemasan produk.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan relatif di atas 75% mempercepat laju korosi pada material logam. Efek atmosferik wilayah pesisir ini diperkuat oleh fakta bahwa interaksi kelembapan tinggi dan aerosol garam mampu meningkatkan laju korosi baja karbon secara eksponensial. Selain kerusakan logam, fluktuasi suhu dan kelembapan udara juga memicu degradasi struktural berupa penurunan kekuatan tarik pada polimer jenis Polyvinyl Chloride (PVC). Pada material elastomer, paparan panas kontinu memicu proses thermal aging yang meningkatkan crosslink density sehingga karet kehilangan elastisitasnya. Faktor-faktor yang memengaruhi saturasi dan difusivitas polimer meliputi sifat polimer (polaritas, mobilitas molekuler), suhu (perilaku Arrhenius), dan ukuran sampel (Le Gac et al., 2026). Degradasi oksidatif merupakan faktor terpenting yang menentukan daya tahan komponen karet di lingkungan teknik (Sánchez et al., 2021). Sementara itu, material higroskopis seperti kayu sangat rentan terhadap fluktuasi kelembapan udara di atas 80% RH yang memicu penyerapan air masif dan menyebabkan kembang-susut (swelling) ekstrem. Kayu adalah bahan higroskopis yang menyerap atau melepaskan air berdasarkan suhu dan kelembapan atmosfer (Hartley, 2001). Perubahan dimensi pada kayu, terutama susut, dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan kadar air dalam dinding sel (Coto, 2004). Sebagai langkah mitigasi, optimasi ventilasi dan tata letak mekanis bangunan gudang dapat diterapkan untuk menstabilkan distribusi temperatur makro ruang penyimpanan. Temuan-temuan tersebut menegaskan pentingnya pengendalian lingkungan penyimpanan terhadap kualitas barang menggunakan pendekatan termodinamika agar dapat diketahui kondisi penyimpanan yang optimal.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas pengaruh suhu maupun kelembapan secara terpisah, kajian yang mengintegrasikan kedua parameter tersebut menggunakan pendekatan termodinamika pada lingkungan gudang di wilayah pesisir Indonesia masih relatif terbatas. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis hubungan suhu dan kelembapan terhadap beberapa jenis material penyimpanan (besi, kayu, PVC, dan karet) menggunakan pendekatan termodinamika berdasarkan data pengukuran aktual pada gudang operasional.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh suhu dan kelembapan gudang terhadap potensi degradasi berbagai material penyimpanan menggunakan pendekatan termodinamika serta menentukan kondisi lingkungan gudang yang mendukung stabilitas kualitas material selama penyimpanan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang dikombinasikan dengan analisis pemodelan termodinamika. Penelitian dilakukan pada gudang operasional tertutup yang berlokasi di kawasan pesisir wilayah Indonesia. Pengambilan data lapangan dilaksanakan selama periode waktu tertentu untuk menangkap fluktuasi cuaca ekstrem akibat pengaruh iklim maritim.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kondisi lingkungan gudang terhadap kualitas material yang disimpan melalui pendekatan termodinamika. Parameter lingkungan yang diamati meliputi suhu udara ($^{\circ}\text{C}$) dan kelembapan relatif (Relative Humidity atau RH) karena kedua parameter tersebut merupakan faktor utama yang memengaruhi mekanisme perpindahan panas, perpindahan massa, serta laju degradasi material selama proses penyimpanan. Peningkatan kelembapan lingkungan secara nyata mempercepat degradasi material (Shi et al., 2026).

Analisis termodinamika menunjukkan variasi iklim mikro signifikan di mana Lantai Dasar memiliki risiko tertinggi untuk korosi besi akibat RH 86,6% dan kondensasi, sementara Area Open Space memicu degradasi polimer dan karet karena suhu tinggi mencapai 32°C . Pemetaan material menunjukkan perlunya strategi penyimpanan berbeda untuk mencegah kerusakan akibat kelembapan tinggi dan paparan panas/UV. Untuk bangunan di pesisir, degradasi material polimer dan pelapis organik didorong oleh paparan radiasi matahari, suhu, kelembapan, dan endapan garam. Penuaan pada sistem ini melibatkan oksidasi foto (photo-oxidation), pemutusan rantai polimer, dan kerusakan antarmuka antara pelapis dan substrat (X. Wang et al., 2026).

Karakteristik Mikroklimat Ruang Penyimpanan

Pengukuran parameter lingkungan dilakukan secara spasial dan temporal menggunakan Environmental Meter EN510 pada tiga zona elevasi dan karakteristik ruang yang berbeda. Hasil tabulasi data rata-rata dari enam titik pengukuran representatif disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Parameter Mikroklimat Lingkungan Gudang (Suhu, Kelembapan, dan Kecepatan Angin)

No	Lokasi Pengukuran	Elevasi / Karakteristik Ruang	Rata-rata Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Rata-rata RH (%)	Kecepatan Angin (V)(m/s)
1	Gudang Tertutup	Lantai Dasar	28,2	86,6	0,00 (statis)
2	Gudang Lantai 1	Lantai 1	31,0	74,0	0,25 (Sirkulasi)

					Minim)
3	Area Luar Gudang	Ruang Terbuka	32,0	68,7	2.57 (Rata-rata) / 5.14 (Maksimum)

Berdasarkan hasil pengukuran parameter lingkungan yang disajikan pada Tabel 1, terlihat adanya variasi iklim mikro yang kontras antar-zona penyimpanan. Area Luar Gudang (Open Space) mencatat suhu rata-rata tertinggi sebesar 32,0°C dengan kelembapan relatif (RH) terendah yakni 68,7%. Sebaliknya, area Lantai Dasar menunjukkan karakteristik termal terendah (28,2°C) namun dengan kelembapan ekstrem mencapai 86,6% RH.

Dalam perspektif termodinamika, fenomena ini mengindikasikan bahwa struktur fisik bangunan gudang mampu menahan beban radiasi panas matahari langsung (solar radiation heat flux) sehingga suhu udara di dalam ruang tertutup menjadi lebih rendah 1,0°C hingga 3,8°C dibandingkan area luar. Namun, sirkulasi udara yang terbatas akibat desain ventilasi makro yang minim menyebabkan terjadinya fenomena akumulasi uap air. Ditinjau dari Hukum Perpindahan Massa, uap air laut yang masuk ke dalam bangunan terperangkap dan gagal mengalami pelepasan massa (mass transfer dead-zone), yang pada gilirannya menaikkan nilai (RH) secara signifikan pada area Lantai Dasar.

Analisis Karakteristik Iklim Mikro dan Psikrometri Udara

Untuk menganalisis risiko kondensasi secara termodinamika pada fase gas, Persamaan (1) dan Persamaan (2) digunakan untuk menghitung nilai temperatur titik embun () pada masing-masing zona. Pada area Lantai Dasar, substitusi data menghasilkan nilai () dan temperatur titik embun () sebesar 25,78°C. Nilai ini menghasilkan margin keamanan kondensasi () yang sangat sempit, yaitu hanya sebesar 2,42°C. Jika permodelan psikrometri ini diterapkan pada Lantai 1 () dan Open Space (), maka didapatkan margin yang jauh lebih longgar. Suhu memengaruhi kinetika reaksi elektrokimia, kelarutan oksigen, dan koefisien difusi ion, yang semuanya memengaruhi laju korosi (Shi et al., 2026). Hal ini membuktikan secara kuantitatif bahwa udara di Lantai Dasar berada dalam kondisi super-jenuh yang sangat kritis terhadap fenomena de-sublimasi atau pengembunan lokal pada permukaan material. Pada baja karbon berkaitan erat dengan suhu lingkungan; semakin tinggi suhu, semakin besar dampaknya terhadap korosi (Liu et al., 2022).

Analisis Termodinamika Perpindahan Kalor Permukaan

Perbedaan mobilitas udara (kecepatan angin) antar-zona memengaruhi mekanisme interaksi energi kinetik di permukaan material. Berdasarkan data Tabel 1, kecepatan angin di dalam gudang (Lantai Dasar dan Lantai 1) bersifat statis hingga minim (), sehingga perpindahan panasnya didominasi oleh konveksi alamiah (natural convection). Namun, pada area Open Space, terekam kecepatan angin rata-rata harian sebesar () dengan kecepatan maksimum mencapai ().

Menggunakan pendekatan konveksi paksa melalui Persamaan (3), nilai koefisien perpindahan panas konveksi paksa empiris () pada kondisi angin rata-rata () didapatkan sebesar (), dan melonjak hingga () saat kecepatan angin mencapai nilai maksimum (). Ketika disubstitusikan ke dalam Persamaan (4), nilai () yang tinggi ini melipatgandakan fluks laju perpindahan panas konveksi () antara udara luar () dan permukaan material. Fluks energi yang masif ini memaksa material polimer dan elastomer di area terbuka untuk mencapai kesetimbangan termal pada suhu tinggi jauh lebih cepat daripada material di dalam ruangan.

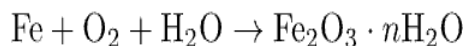
Analisis Potensi Degradasi Multi-Material Spasial

Material besi merupakan komponen yang menerima dampak reduksi struktural paling destruktural di lingkungan pesisir. Batas kritis korosi atmosferik () telah terlampaui di seluruh zona sampling. Penelitian menunjukkan bahwa ketika kelembapan relatif mencapai atau melebihi 60%, laju korosi baja meningkat secara signifikan (Shi et al., 2026). Korosi atmosferik pada logam dan paduan biasanya terjadi di bawah lapisan film air tipis pada permukaan logam (Tsuru et al., 1995). Fenomena pengembunan akibat sempitnya margin di Lantai Dasar (sebagaimana dihitung pada Sub-bab Analisis Karakteristik Mikroklimat dan Psikrometri Udara) menyebabkan uap air ter-kondensasi secara kontinu menjadi lapisan film elektrolit cair di atas permukaan besi. Penguapan yang mengakibatkan penipisan film cair meningkatkan konsentrasi elektrolit dan memengaruhi konduktivitas permukaan logam (Thee et al., 2014).



Gambar 1. Dampak Terjadinya Korosi Pada Material Baja Carbon Lantai Dasar

Lapisan air ini berinteraksi langsung dengan aerosol laut kaya ion klorida () yang bertindak sebagai katalis korosi elektrokimia.. Reaksi oksidasi pembentukan material karat mengikuti Persamaan (7):



Tingginya kadar elektrolit lokal ini menjelaskan mengapa laju degradasi korosi besi di Lantai Dasar berjalan secara eksponensial dibandingkan area lainnya.

Sebagai material organik yang bersifat higroskopis, karakteristik degradasi kayu dikendalikan oleh fluktuasi kelembapan udara makro. Berdasarkan hukum kesetimbangan massa, kayu di Lantai Dasar () dan Lantai 1 () akan terus menyerap uap air hingga mencapai titik kesetimbangan kadar air yang dimodelkan pada Persamaan (5) (Equilibrium Moisture Content / EMC). Kayu sangat rentan terhadap faktor lingkungan seperti radiasi UV, fluktuasi suhu, dan kelembapan (siklus basah-kering). Siklus basah-kering (dry and wet cycle) diketahui memiliki pengaruh signifikan terhadap penurunan sifat mekanik dan densitas kayu (Xin et al., 2024).

Berdasarkan pemodelan Persamaan (5), substitusi nilai kelembapan Lantai Dasar () menghasilkan nilai kesetimbangan kadar air (EMC) kayu berkisar antara 11,45% pada gudang lantai 1 dan 18,33% pada gudang lantai dasar dengan asumsi kayu jenis Pinewood. Nilai EMC ini telah melampaui batas aman serat kering kayu (), yang secara struktural menjelaskan mengapa fenomena swelling dan pertumbuhan fungi terjadi secara masif pada zona Gudang bagian dasar.



Gambar 2. Kotak Kayu Pinewood Packing Material Lantai Dasar

Pada Gambar 2, tingginya nilai EMC pada zona Lantai Dasar menyebabkan air masuk ke dalam ruang interseluler dan dinding sel kayu, memicu pemuaian volume serat (swelling) serta ketidakstabilan dimensi yang berujung pada deformasi permanen. Akumulasi air bebas ini juga menurunkan kekuatan mekanis kayu dan menciptakan mikroklimat ideal bagi pertumbuhan spora jamur (fungi).

Berbeda dengan kayu, material karet alam (natural rubber) menunjukkan ketahanan yang baik terhadap air, tetapi sangat rentan terhadap penuaan termal (thermal aging). Pada karet silikon, kondisi lingkungan seperti lingkungan laut tropis yang melibatkan paparan UV, suhu, dan kelembapan (UTH) menyebabkan tahapan penuaan yang berbeda, mulai dari oksidasi awal hingga retak yang intensif (R. Y. Wang et al., 2025).



Gambar 3. Penyimpanan Rubber Belt Area Open Space

Risiko kerusakan tertinggi terkonsentrasi di Lantai 1 () dan Open Space (). Berdasarkan Persamaan (6) (Persamaan Arrhenius), konstanta laju kerusakan ikatan kimia polimer (k) dipengaruhi secara eksponensial oleh temperatur mutlak lingkungan. Karena penelitian ini berbasis observasi mikroklimat lapangan, analisis dilakukan secara komparatif menggunakan pendekatan energi aktivasi () standar untuk karet alam sebesar merujuk pada jurnal (Ma et al., 2022).

Dengan mengonversi suhu rata-rata ke satuan Kelvin (dan), perhitungan rasio kinetika menghasilkan nilai . Temuan kuantitatif ini membuktikan bahwa meskipun perbedaan suhu aktual hanya sebesar 3,8°C, laju degradasi dan pemutusan rantai utama pada elastomer di area Open Space berjalan 64% lebih cepat dibandingkan dengan Lantai Dasar. Akselerasi kinetika ini menjelaskan secara tegas mengapa kerusakan fisik berupa pengerasan tekstur (hardening) dan retak mikro (microcracks) terkonsentrasi pada area terbuka dan Lantai 1.

Fenomena serupa juga terjadi pada matriks polimer Polyvinyl Chloride (PVC) di mana kekuatan mekanisnya melemah akibat beban termal di Lantai 1 () dan Open Space (). Melalui substitusi parameter termal ke dalam Persamaan (6), konstanta laju degradasi zat aditif (k) di area Lantai 1 tercatat 44% lebih tinggi dibandingkan kondisi baseline Lantai Dasar. Pasokan energi kinetik kontinu yang masif ini melampaui batas energi aktivasi () yang diperlukan untuk memicu migrasi serta penguapan komponen plasticizer dari dalam struktur PVC. Akibatnya, PVC kehilangan fleksibilitas molekulernya secara struktural, yang secara makroskopis terwujud dalam bentuk perubahan warna (discoloration) dan penurunan kekuatan tarik (tensile strength).

KESIMPULAN

Hasil perhitungan dengan menggunakan rumus Magnus-Tetens menunjukkan bahwa material besi berpotensi mengalami kerusakan masif pada kelembapan ekstrem 86,6% di dalam gudang tertutup. Secara spasial, risiko degradasi material terbagi menjadi dua kluster beban termodinamika. Hal ini sesuai dengan karakteristik degradasi material besi di lingkungan pesisir, di mana margin keamanan temperatur aktual terhadap titik embun yang sangat sempit (2,42°C) memicu pembentukan lapisan film air korosif secara kontinu pada permukaan logam. Di satu sisi, beban kelembapan tinggi di Lantai Dasar mendegradasi besi melalui korosi elektrokimia dan kayu melalui pembengkakan serat akibat nilai EMC (18,33%) yang melewati batas aman serat kering. Di sisi lain, beban termal di Lantai 1 dan Open Space mempercepat thermal aging pada material karet alam sebesar 64% lebih cepat, serta meningkatkan laju degradasi PVC sebesar 44% akibat migrasi komponen plasticizer. Oleh karena itu, pengendalian kelembapan melalui peningkatan ventilasi, penggunaan sistem dehumidifikasi, serta pemantauan suhu dan kelembapan secara berkala menjadi langkah penting untuk memperpanjang umur simpan material di gudang.

DAFTAR PUSTAKA

- Coto, Z. (2004). Tingkat Stabilisasi Dimensi Delapan Jenis Kayu Indonesia Dimensional Stability Of Eight Indonesian Species. 2(1), 34–39.
- Hartley, I. (2001). Wood: Moisture Content, Hygroscopicity, and Sorption. In *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 9668–9673). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043152-6/01753-8>
- Le Gac, P. Y., Le Gall, M., Humeau, C., Arhant, M., & Davies, P. (2026). Polymers in the ocean: understanding long-term durability and degradation—a review. *Npj Materials Degradation*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41529-026-00780-1>
- Liu, Y., Liu, M., Lu, X., & Wang, Z. (2022). Effect of temperature and ultraviolet radiation on corrosion behavior of carbon steel in high humidity tropical marine atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124962>
- Ma, W., Wang, H., Wang, Y., Neville, A., & Hua, Y. (2022). Experimental and simulation studies of the effect of surface roughness on corrosion behaviour of X65 carbon steel under intermittent oil/water wetting. *Corrosion Science*, 195, 109947. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109947>
- Sánchez, M. A. G., Giraldo-Vásquez, D. H., & Sánchez, R. M. (2021). The effect of thermal

- ageing on the mechanical properties of natural rubber-based compounds used for rubber bearings. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(3). <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.3.10>
- Shi, M., Sun, X., Wang, Y., & Yin, T. (2026). Experimental investigation on the corrosion degradation mechanisms of steel strands under the coupled effect of humidity and chloride. *Materials Today Communications*, 53, 115347. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2026.115347>
- Thee, C., Hao, L., Dong, J., Mu, X., Wei, X., Li, X., & Ke, W. (2014). Atmospheric corrosion monitoring of a weathering steel under an electrolyte film in cyclic wet-dry condition. *Corrosion Science*, 78, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.09.008>
- Tsuru, T., Nishikata, A., & Wang, J. (1995). Electrochemical studies on corrosion under a water film. *Materials Science and Engineering A*, 198(1–2), 161–168. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)80071-2](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)80071-2)
- Wang, R. Y., Dou, Z. F., Li, H. S., Li, N., Liu, X. R., & Zhang, W. F. (2025). Degradation behavior and aging mechanisms of silicone rubber under Ultraviolet–Thermal–Humidity Coupling in simulated tropical marine atmospheric environment. *Polymer*, 328, 128398. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2025.128398>
- Wang, X., Huang, Y., Yao, W., Gao, W., Guo, C., Zhao, J., & Hu, S. (2026). Multi-physical field coupling effects on the durability of polymeric and organic coating–substrate systems for coastal building envelopes: Mechanisms, modeling, and enhancement strategies. *Progress in Organic Coatings*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2026.110341>
- Xin, Z., Li, Y., Qiu, X., Zhang, H., Zhou, J., Yuan, J., Zong, Y., & Zhang, T. (2024). Effects of environmental factors on natural aging of timber members of ancient buildings: Ultraviolet radiation, temperature and moisture. *Construction and Building Materials*, 456, 139303. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.139303>