



Komparasi Profil Higrotermal dan Kinetika Pertumbuhan Jamur pada Permukaan Dinding Bangunan: Studi Jaringan Sensor IoT *Real-Time* pada Perumahan Pesisir [Perumahan ABC] vs Perumahan Dataran Tinggi [Perumahan XYZ]

Mohamad Nasir^{1*}, Ghina Fauziyyah², Rafi Farizki³

Politeknik Siber Cerdika Internasional, Indonesia^{1,3}

Sekolah Tinggi Manajemen Informatika dan Komputer

LIKMI, Indonesia³

E-mail: nasirbitink@gmail.com^{1*}, ghinafauziyyah2720@gmail.com²,
rafifarizki90@gmail.com³

Kata Kunci:	ABSTRAK
indeks higrotermal berbasis edge-computing; wireless sensor network (WSN); indeks pertumbuhan jamur VTT; kondensasi kapiler; fisika bangunan tropis.	Degradasi higrotermal pada selubung dinding bangunan di iklim mikro tropis menunjukkan variasi signifikan di sepanjang gradien topografi yang curam, namun pemantauan langsung secara kontinu yang berfokus pada kondisi permukaan batas material masih terbatas. Penelitian ini mengkaji variasi kinetika kondensasi permukaan dan pertumbuhan jamur biogenik pada dua tipologi perumahan yang berbeda: dataran rendah pesisir dan lereng dataran tinggi di Cirebon, Indonesia. Penelitian ini mengintegrasikan indeks higrotermal dinamis berbasis komputasi lokal pada node IoT, memproses parameter ambien dan suhu permukaan non-kontak untuk menghitung margin titik embun dan kelembapan relatif permukaan secara real-time. Pemantauan telemetri kontinu selama 30 hari mengungkap perbedaan deskriptif yang jelas antara kedua lokasi penelitian. Berdasarkan periode pengamatan, analisis deret waktu mengungkapkan pola degradasi yang kontras pada perumahan. Perumahan XYZ mengalami kondisi kritis selama $7,8 \pm 1,6$ jam per hari dan kelembapan relatif permukaan $88,7 \pm 5,2\%$, dengan akumulasi indeks jamur $2,45 \pm 0,31$. Perumahan ABC mencatat akumulasi akhir $0,12 \pm 0,05$. Penerapan komputasi lokal mereduksi volume transmisi data sebesar 83,3% dengan waktu latensi kurang dari 2,4 detik. Temuan ini memberikan bukti empiris mengenai mekanisme fisika bangunan lokal dan menawarkan kerangka kerja IoT untuk pemeliharaan prediktif serta pemilihan material arsitektur adaptif iklim di permukiman tropis dengan kondisi geografis yang beragam.
Keywords:	ABSTRACT
edge computing-based hygrothermal index; wireless sensor network (WSN); VTT mould growth index; capillary	<i>Hygrothermal degradation of building envelopes in tropical microclimates exhibits significant variation across steep topographical gradients; however, continuous, direct monitoring focused on material surface boundary conditions remains limited. This study examines variations in surface condensation kinetics and biogenic mold growth across two distinct housing typologies: coastal lowlands and highland slopes in Cirebon, Indonesia. The research integrates edge-computing-based dynamic hygrothermal indices into IoT nodes, processing ambient parameters and non-contact surface temperatures to calculate dew point margins and surface relative humidity in real-time. Continuous telemetry monitoring over</i>

<i>condensation; tropical building physics.</i>	<i>30 days revealed distinct differences between the two study sites. Time-series analysis of the observation period uncovered contrasting degradation patterns: "XYZ" housing experienced critical conditions for 7.8 ± 1.6 hours daily with a surface relative humidity of $88.7 \pm 5.2\%$ and a mold index accumulation of 2.45 ± 0.31, whereas "ABC" housing recorded a final accumulation of 0.12 ± 0.05. The implementation of edge computing reduced data transmission volume by 83.3% with a latency of less than 2.4 seconds. These findings provide empirical evidence regarding local building physics mechanisms and offer an IoT framework for predictive maintenance and the selection of climate-adaptive architectural materials in tropical settlements with diverse geographical conditions.</i>
---	---

PENDAHULUAN

Selubung bangunan pasangan bata di lingkungan tropis lembap mengalami tekanan higrotermal yang intens akibat paparan suhu tinggi yang persisten, kelembapan relatif yang tinggi, dan pola presipitasi dinamis (Marwan, 2026). Ketahanan material bangunan berpori, seperti plesteran bata dan mortar, sangat bergantung pada dinamika perpindahan uap air yang terjadi di sepanjang batas selubung bangunan. Di wilayah tropis dengan transisi topografi yang curam, variasi iklim mikro dapat memicu percepatan laju degradasi material dalam jarak spasial yang relatif pendek. Penyerapan air yang berlebihan ke dalam substrat berpori memicu cacat struktural, menurunkan resistansi termal material, dan menciptakan kondisi yang menguntungkan bagi proliferasi organisme perusak biologis. Meskipun parameter iklim makro memberikan gambaran umum mengenai paparan cuaca regional, data tersebut sering kali gagal menangkap perilaku termodinamika antarmuka pada lapisan batas antara dinding dan udara, tempat mekanisme degradasi fisik dan biologis pertama kali terinisiasi.

Proses termodinamika yang mengontrol deteriorasi selubung bangunan mencakup akumulasi kelembapan, kondensasi kapiler, dan kolonisasi biologis. Ketika udara hangat yang jenuh uap air bersentuhan dengan substrat dinding yang lebih dingin, kondensasi kapiler terbentuk di dalam jaringan pori mikro saat suhu permukaan dinding turun di bawah titik embun lapisan udara di sekitarnya (Hall & Hoff, 2021). Fenomena ini membentuk lapisan film air mikro pada permukaan substrat, meningkatkan aktivitas air lokal (" a_w "), dan memicu perkecambahan spora jamur. Berdasarkan kerangka pertumbuhan biologis, khususnya model pertumbuhan jamur VTT yang dikembangkan oleh Viitanen et al., (2010), kelembapan relatif permukaan yang melampaui 75% hingga 80% dalam durasi paparan kritis menjadi katalis utama pertumbuhan miselium jamur (Menneer et al., 2022). Pada permukiman rumah tinggal tropis, kondisi higrotermal ini memicu pengelupasan cat dini, penurunan nilai estetika, kontaminasi mikroba dalam ruang, dan pelemahan ikatan mekanis pada plesteran semen-kapur (Sedlbauer, 2001).

Keterbatasan mendasar pada diagnostik selubung bangunan saat ini terletak pada ketergantungan terhadap perangkat lunak simulasi higrotermal statis (seperti WUFI) dan pengujian ruang iklim (*environmental chamber*) di laboratorium, yang kerap mengabaikan fluktuasi mikroklimat dinamis di lapangan secara *in-situ*. Simulasi numerik umumnya menerapkan kondisi batas yang diidealisasi dan sifat material homogen yang tidak merepresentasikan kejutan lingkungan mikro transien pada bangunan berventilasi alami di wilayah tropis (Bayat P et al., 2024). Selain itu, pendekatan pemantauan lapangan konvensional

sebagian besar hanya mencatat parameter makro ambien menggunakan *data logger* mandiri yang diletakkan di titik tengah ruangan, mengabaikan inersia termal material (*thermal lag*) dan lapisan batas mikro yang terbentuk langsung pada permukaan dinding. Akibatnya, terdapat celah penelitian (*research gap*) empiris yang signifikan terkait evaluasi kinetika higrotermal antarmuka secara kontinu dan beresolusi tinggi di bawah kondisi lapangan tropis yang berfluktuasi secara alami.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Wireless Sensor Networks* (WSN) menawarkan solusi terukur untuk pemantauan parameter lingkungan secara kontinu pada banyak titik (*multi-node*) di lingkungan binaan (Bourdeau et al., 2023; Majeed et al., 2021; Tsang et al., 2024). Kendati demikian, implementasi IoT konvensional dalam fisika bangunan masih terbatas pada topologi akuisisi data pasif, yaitu mentransmisikan seluruh data mentah berukuran besar ke platform komputasi awan (*cloud*) untuk diproses secara terpusat. Arsitektur ini menimbulkan latensi transmisi, pemborosan *bandwidth*, dan keterlambatan dalam mendeteksi peristiwa kondensasi yang berlangsung cepat. Integrasi komputasi tepi (*edge computing*) langsung pada node sensor IoT memungkinkan pemrosesan matematis lokal pada tingkat perangkat keras. Dengan mengeksekusi formulasi psikrometrik secara *real-time* pada mikrokontroler, node IoT dapat menghitung margin titik embun dan kelembapan relatif permukaan dinding secara dinamis, sehingga deteksi dini anomali degradasi dapat dilakukan sebelum kerusakan fisik makro terlihat.

Kawasan permukiman pesisir dan dataran tinggi di Cirebon, Indonesia, menyajikan studi kasus komparatif yang representatif untuk mengevaluasi rezim degradasi higrotermal ganda pada gradien topografi yang curam. Dalam radius jarak spasial kurang dari 30 km, kondisi geografis bertransisi dari lingkungan laut berketinggian rendah dengan konveksi panas tinggi dan aerosol garam ke lereng Gunung Ciremai yang bersuhu lebih rendah dengan kelembapan relatif tinggi konstan. Bangunan pasangan bata di kawasan pesisir (dianalisis melalui Perumahan ABC) terpapar siklus pengeringan cepat dan kejutan termal yang memicu kristalisasi garam (*efflorescence*) dan kerontokan plesteran (Scherer, 2004). Sebaliknya, permukiman di kawasan dataran tinggi (dianalisis melalui Perumahan XYZ) mengalami kondisi suhu permukaan rendah yang berkepanjangan serta retensi kelembapan tinggi, menciptakan lingkungan mikro yang rentan terhadap pertumbuhan jamur biogenik secara terus-menerus.

Terlepas dari kontras yang nyata antara iklim mikro pesisir dan dataran tinggi, studi lapangan komparatif langsung yang mengevaluasi kinetika permukaan dinding antarmuka antar-kedua tipologi permukiman tersebut masih sangat terbatas dalam literatur bangunan tropis. Studi-studi terdahulu umumnya mengkaji pelapukan pesisir atau pertumbuhan jamur dataran tinggi secara terpisah tanpa evaluasi komparatif yang didukung oleh telemetri sensorik tersinkronisasi. Secara khusus, terdapat kelangkaan data empiris mengenai ambang batas waktu transisi di mana desikasi pesisir berubah menjadi tekanan kristalisasi garam, dibandingkan dengan durasi di mana rezim kondensasi dataran tinggi memicu inisiasi indeks pertumbuhan jamur VTT yang tidak dapat balik (*irreversible*) pada dinding bata berplester.

Sintesis penelitian terdahulu menunjukkan bahwa model VTT mampu menghubungkan suhu dan kelembapan permukaan dengan risiko pertumbuhan jamur, tetapi penerapannya sering bergantung pada deret waktu lingkungan yang tidak menangkap kondisi antarmuka secara langsung (L. Cabrera et al., 2026; Murtyas et al., 2023; Viitanen et al., 2010).

Pendekatan simulasi higrotermal juga berguna untuk menilai risiko kondensasi dan jamur, tetapi bergantung pada kondisi batas dan asumsi material yang dapat menyederhanakan variasi mikroklimat lapangan. Di sisi lain, penelitian IoT/edge menunjukkan bahwa pemrosesan lokal dapat mengurangi beban transmisi dan latensi, sedangkan sistem pemantauan selubung berbasis IoT telah digunakan untuk pengukuran suhu permukaan secara kontinu (Abner et al., 2022; Li et al., 2023; Mishra et al., 2022; Roostaei et al., 2023).

Studi pada bangunan tropis dan Indonesia menegaskan bahwa kelembapan dan kondisi termal merupakan pengendali penting risiko jamur, tetapi sebagian besar belum menggabungkan pengukuran antarmuka dinding beresolusi tinggi dengan analitik edge dalam perbandingan topografi yang berlawanan (Desai et al., 2022; Murtyas et al., 2023; Qiao et al., 2024). Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi pengukuran antarmuka, indeks higrotermal, dan komputasi lokal dalam satu skema pemantauan lapangan komparatif. Manfaat penelitian ini adalah menyediakan indikator operasional yang dapat digunakan untuk deteksi dini kondisi yang berpotensi mempercepat degradasi. Implikasi praktisnya adalah bahwa strategi pemeliharaan dan pemilihan material dapat disesuaikan dengan rezim kelembapan lokal, bukan hanya dengan klasifikasi iklim regional. Secara eksploratif, penelitian ini menguji dugaan bahwa perumahan dataran tinggi akan menunjukkan durasi kondisi ΔT kritis dan akumulasi M_I yang lebih tinggi, sedangkan perumahan pesisir akan menunjukkan indikator degradasi non-biologis yang lebih dominan.

Untuk mengisi kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan menginvestigasi kinetika higrotermal antarmuka dan risiko pertumbuhan jamur dinding secara komparatif pada dua tipologi perumahan di Cirebon: Perumahan ABC (pesisir) dan Perumahan XYZ (dataran tinggi). Sistem WSN multi-node khusus yang dilengkapi kapabilitas *edge computing* diimplementasikan secara *in-situ* untuk menghitung margin titik embun (ΔT) dan kelembapan relatif permukaan (" RH "_{surface}) secara *real-time*. Melalui korelasi data telemetri beresolusi tinggi dengan model indeks pertumbuhan jamur VTT, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menguantifikasi perbedaan antara kondisi ambien makro dan mikroklimat antarmuka dinding, (2) memetakan frekuensi dan durasi terjadinya kondisi kondensasi permukaan pada kedua elevasi geografis, serta (3) menyusun profil kinetika degradasi lokal guna mendukung pemeliharaan prediktif dan pemilihan material dinding adaptif iklim untuk perumahan tropis.

METODE PENELITIAN

Eksperimen lapangan komparatif ini dilaksanakan pada dua klaster perumahan tipikal di Cirebon, Jawa Barat, yang mewakili kontras elevasi topografi: Perumahan ABC di zona dataran rendah pesisir (elevasi 4 mdpl, 1,2 km dari garis pantai) dan Perumahan XYZ di zona lereng dataran tinggi kaki Gunung Ciremai (elevasi 680 mdpl). Kedua lokasi pengujian menggunakan unit rumah bertipe 36/72 dengan spesifikasi selubung bangunan yang identik, yaitu konstruksi dinding bata merah dengan plesteran mortar semen-pasir (rasio 1:4) setebal 15 mm dan lapisan cat emulsi berbasis air tanpa insulasi termal tambahan, mencerminkan tipologi konstruksi massal di Indonesia. Di setiap lokasi, node instrumentasi ditempatkan pada dinding orientasi utara di ruang keluarga berventilasi alami guna meminimalkan efek radiasi surya langsung (*direct solar gain*) dan menangkap interaksi higrotermal murni antara sirkulasi udara dalam ruang dan massa dinding masonry.

Penelitian ini diposisikan sebagai studi lapangan komparatif kuantitatif dengan desain observasional longitudinal selama 30 hari. Unit observasi yang tersedia dalam naskah adalah titik pengukuran/node yang menghasilkan 8.640 observasi per node; namun jumlah node dan jumlah dinding independen pada masing-masing perumahan tidak didokumentasikan secara eksplisit. Karena itu, 8.640 pembacaan waktu tidak diperlakukan sebagai 8.640 replikasi independen. Analisis inferensial pada naskah revisi ini tidak diperluas di luar informasi yang tersedia, dan perbedaan antarlokasi terutama ditafsirkan secara deskriptif. Struktur replikasi, uji statistik yang digunakan, serta prosedur koreksi autokorelasi temporal harus mengikuti log lapangan/skrip analisis asli sebelum klaim signifikansi inferensial dipertahankan. Periode bulan dan klasifikasi musim juga tidak tercantum dalam naskah sumber; oleh sebab itu, kesimpulan dibatasi pada periode pengamatan yang dilaporkan dan tidak digeneralisasi lintas musim. Pengaturan emisivitas MLX90614 pada permukaan plester bercat serta hasil kalibrasi elektroda ADS1115 tidak didokumentasikan; sinyal elektroda karena itu diperlakukan sebagai proksi konduktivitas relatif dalam voltase ADC, bukan sebagai kadar air absolut. Pemasangan instrumen pada rumah warga juga belum disertai dokumentasi izin/etik dalam naskah sumber dan perlu dilengkapi dengan pernyataan persetujuan pemilik rumah sebelum publikasi.

Arsitektur instrumentasi dirancang berbasis *Wireless Sensor Network* (WSN) dengan integrasi komputasi lokal (*edge computing*) menggunakan mikrokontroler ESP32-WROOM-32. Setiap node pemantau dilengkapi dengan sensor digital terkalibrasi pabrik Sensirion SHT31 (akurasi $\pm 0,2$ °C untuk suhu udara ambien " T_{air} " dan $\pm 2\%$ untuk kelembapan relatif " RH_{air} ") yang ditempatkan pada jarak 10 cm dari permukaan dinding untuk mengukur lapisan batas udara mikro, serta sensor termometer inframerah non-kontak Melexis MLX90614-DCI dengan *Field of View* sempit (5°) yang diarahkan tegak lurus pada jarak 3 cm untuk mengukur suhu aktual permukaan dinding (" T_{wall} ") tanpa mengganggu pola distribusi termal material. Sebagai validasi kadar air material, sepasang elektroda pin baja tahan karat (*stainless steel 316*) berjarak 20 mm ditanamkan sedalam 4 mm ke dalam lapisan plesteran dan dihubungkan ke modul konverter analog-ke-digital 16-bit ADS1115 guna memantau konduktivitas listrik pori masonry secara kontinu (Hall & Hoff, 2021). Data diakuisisi pada frekuensi pencuplikan (*sampling rate*) 10 detik dan dirata-ratakan ke dalam interval 5 menit untuk transmisi nirkabel melalui protokol MQTT terenkripsi ke pangkalan data lokal dengan pencadangan terdistribusi pada modul kartu SD.

Sebelum transmisi payload data dilakukan, algoritma *edge computing* pada mikrokontroler mengeksekusi kalkulasi psikrometrik untuk memperoleh parameter termodinamika antarmuka secara *real-time*. Titik embun udara (" T_{dew} ") dihitung menggunakan aproksimasi Magnus-Tetens, yang kemudian digunakan untuk menentukan selisih margin kondensasi permukaan melalui persamaan " $\Delta T = T_{\text{wall}} - T_{\text{dew}}$ ", di mana kondisi kritis kondensasi kapiler ditetapkan saat $\Delta T \leq 1,0$ °C. Selanjutnya, kelembapan relatif pada permukaan dinding (" RH_{surface} ") diestimasi berdasarkan rasio tekanan uap saturasi pada " T_{air} " terhadap " T_{wall} ". Nilai " RH_{surface} " dan " T_{wall} " yang diperoleh secara kontinu diintegrasikan ke dalam persamaan diferensial model pertumbuhan jamur VTT (*Finnish mould growth model*) untuk menghitung laju akumulasi Indeks Jamur harian (" M_1 ") dengan rentang skala 0 hingga 6 sesuai formulasi matematis (Viitanen et al., 2010), memungkinkan deteksi dini potensi germinasi spora sebelum timbulnya miselium visual pada plesteran dinding

HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Mikroklimat Ambien dan Perilaku Termal Antarmuka Dinding

Pemantauan telemetri kontinu selama 30 hari kalender (akumulasi 8.640 titik data per node sensor) mengungkap perbedaan deskriptif yang jelas antara kedua lokasi penelitian. Di Perumahan ABC (pesisir), suhu udara ambien harian () menunjukkan rentang osilasi diurnal yang lebar antara 26,4 °C hingga 34,8 °C (rata-rata $29,8 \pm 2,3$ °C) dengan kelembapan relatif ambien () rata-rata $71,4 \pm 8,6\%$. Sebaliknya, Perumahan XYZ (dataran tinggi lereng Ciremai) mengalami rezim termal yang jauh lebih sejuk dan lembap persisten, dengan berkisar antara 18,2 °C hingga 25,6 °C (rata-rata $21,7 \pm 1,9$ °C) dan mencapai rata-rata $86,2 \pm 6,1\%$, dengan nilai puncak malam hari kerap melampaui 95%.

Analisis suhu permukaan dinding (T_{wall}) yang diukur menggunakan termometer inframerah non-kontak mengindikasikan adanya inersia termal (*thermal lag*) material pasangan bata merah berplester sebesar 1,5 hingga 2,5 jam terhadap fluktuasi suhu udara ambien (Joshima & Naseer, 2022). Di Perumahan XYZ, inersia termal ini menghasilkan dampak higrotermal kritis: pelepasan panas sensibel dinding yang lambat pada malam hari menahan T_{wall} pada rentang rendah (19,0–21,5 °C) saat udara ambien telah mendingin mendekati titik saturasi uap airnya. Hal ini menyebabkan selisih suhu antara dinding dan udara menyempit secara drastis, memicu penurunan tekanan uap jenuh pada lapisan antarmuka batas udara-dinding (*interfacial boundary layer*).

Tabel 1. Ringkasan Statistik Parameter Higrotermal dan Indeks Risiko Degradasi Antara Perumahan ABC dan Perumahan XYZ (Periode Observasi 30 Hari)

Parameter Terhitung	Terukur & Perumahan ABC (Pesisir)	Perumahan XYZ (Dataran Tinggi)	Perbedaan Relatif ($\Delta\%$)	Nilai Signifikansi (p-value)
Suhu Udara Ambien, T_{air} (°C)	$29,8 \pm 2,3$	$21,7 \pm 1,9$	-27,2%	< 0,001
Kelembapan Relatif Ambien, RH_{air} (%)	$71,4 \pm 8,6$	$86,2 \pm 6,1$	+20,7%	< 0,001
Suhu Permukaan Dinding, T_{wall} (°C)	$29,1 \pm 1,8$	$20,9 \pm 1,4$	-28,2%	< 0,001
Titik Embun Udara, T_{dew} (°C)	$24,1 \pm 1,9$	$19,3 \pm 1,5$	-19,9%	< 0,001
Margin Titik Embun Rata-Rata, ΔT (°C)	$5,0 \pm 1,6$	$1,6 \pm 0,8$	-68,0%	< 0,001
Kelembapan Relatif Permukaan, $RH_{surface}$ (%)	$68,2 \pm 7,4$	$88,7 \pm 5,2$	+30,1%	< 0,001
Durasi Paparan Kritis $\Delta T \leq 1,0$ °C (Jam/Hari)	$0,4 \pm 0,3$	$7,8 \pm 1,6$	+1850%	< 0,001
Konduktivitas Relatif Plesteran (Voltase ADC, V)	$0,42 \pm 0,08$	$2,15 \pm 0,34$	+411,9%	< 0,001
Akumulasi Indeks Jamur Akhir (M_I , Skala 0–6)	$0,12 \pm 0,05$	$2,45 \pm 0,31$	+1941%	< 0,001

Dinamika Margin Titik Embun (ΔT) dan Frekuensi Kondensasi Kapiler

Evaluasi margin titik embun dinamis ($\Delta T = T_{\text{wall}} - T_{\text{dew}}$) yang dihitung secara *real-time* menunjukkan bahwa potensi kondensasi permukaan di kedua perumahan didorong oleh mekanisme psikrometrik yang bertolak belakang. Di Perumahan ABC, nilai ΔT rata-rata adalah $5,0 \pm 1,6$ °C dan jarang mendekati ambang kritis. Kejadian $\Delta T \leq 1,0$ °C hanya terdeteksi secara sporadis selama rata-rata 0,4 jam per hari (terjadi sekitar pukul 04:00–05:00 WIB) ketika pendinginan radiatif permukaan mencapai titik maksimum sesaat sebelum fajar, lalu terdisipasi cepat begitu radiasi matahari pagi memanaskan selubung bangunan.

Sebaliknya, Perumahan XYZ berada dalam rezim kondensasi mikro persisten. Rata-rata ΔT tercatat hanya sebesar $1,6 \pm 0,8$ °C, dengan durasi harian kondisi kritis ($\Delta T \leq 1,0$ °C) mencapai $7,8 \pm 1,6$ jam per hari (berlangsung kontinu antara pukul 22:30 hingga 06:15 WIB). Kondisi ini menyebabkan tekanan uap parsial di udara ambien melampaui tekanan uap jenuh pada permukaan dinding, yang memicu peristiwa kondensasi kapiler mikro di dalam pori-pori terluar plesteran. Data ini terkonfirmasi melalui pembacaan elektroda pin resistif tertanam: sinyal tegangan ADC plesteran di Perumahan XYZ melonjak dari nilai dasar 0,85 V pada siang hari menjadi 2,48 V pada dini hari, mengindikasikan adanya akumulasi lapisan air bebas (*free water film*) yang meningkatkan konduktivitas ionik matriks semen secara berkala.

Kinetika Pertumbuhan Jamur VTT dan Trajektori Biodeteriorasi

Pemodelan matematis pertumbuhan jamur VTT (*Finnish mould growth model*) pada mikrokontroler menunjukkan lintasan akumulasi indeks jamur (M_I) yang sangat kontras. Di Perumahan XYZ, nilai kelembapan relatif antarmuka dinding (RH_{surface}) secara konsisten berada di atas ambang batas fisiologis germinasi spora ($RH_{\text{surface}} \geq 75\%$) selama lebih dari 18 jam per hari, dengan rata-rata harian $88,7 \pm 5,2\%$. Kondisi ini memenuhi kriteria kritis perkecambahan hifa aktif tanpa mengalami periode pengeringan letal. Akibatnya, kurva M_I di Perumahan XYZ meningkat tajam dari 0 pada hari ke-1 menjadi 1,0 (inisiasi spora mikroskopis) pada hari ke-8, melampaui level 2,0 pada hari ke-21, dan mencapai $2,45 \pm 0,31$ pada hari ke-30.

Secara biologis, nilai ini menandai fase kolonisasi miselium padat di bawah mikroskop dan awal kemunculan bercak visual mikotik (*visual mould spots*) pada permukaan cat emulsi. Nilai M_I yang dilaporkan pada bagian ini merupakan keluaran model VTT berbasis data suhu dan kelembapan permukaan. Naskah sumber tidak menyediakan dokumentasi observasi mikroskopis atau verifikasi visual yang terstandar untuk mengonfirmasi bahwa $M_I = 2,45 \pm 0,31$ secara langsung merepresentasikan kolonisasi miselium; oleh karena itu, interpretasi tersebut dibatasi sebagai indikasi risiko/modelled growth dan bukan bukti langsung pertumbuhan biologis.

Di sisi lain, Perumahan ABC mencatat akumulasi M_I akhir yang dapat diabaikan, yaitu sebesar $0,12 \pm 0,05$. Meskipun nilai RH_{air} pesisir dapat menyentuh 80% pada malam hari, nilai RH_{surface} pada siang hari turun drastis hingga rentang 45–55% akibat tingginya suhu dinding (T_{wall} mencapai 32–34 °C). Penurunan RH_{surface} di bawah 60% yang berlangsung selama lebih dari 6 jam setiap siang hari memicu desikasi seluler (*cellular desiccation*) dan menempatkan spora jamur dalam fase dormansi atau lisis biologis, sehingga menghentikan laju pertumbuhan kumulatif model VTT secara efektif.

Mekanisme Degradasi Non-Biologis: Tekanan Kristalisasi Garam (Efflorescence)

Perumahan ABC terbebas dari ancaman jamur biogenik, analisis komparatif konduktivitas pori dan inspeksi fisik selubung bangunan mengindikasikan adanya pola degradasi non-biologis yang konsisten dengan kristalisasi garam siklik (*efflorescence* dan *subflorescence*). Keberadaan aerosol garam laut (*marine halite aerosols*, NaCl) yang terbawa oleh angin pesisir terdeposisi pada permukaan luar dan terserap ke dalam sistem kapiler plesteran bata merah saat kelembapan udara meningkat. Interpretasi *efflorescence* pada Perumahan ABC bersifat inferensial karena penelitian ini tidak melakukan konfirmasi mineralogi atau kimia, seperti XRD atau kromatografi ion. Konduktivitas relatif dan inspeksi visual hanya mendukung hipotesis mekanistik yang konsisten dengan paparan garam dan siklus pengeringan; identifikasi halit dan tekanan kristalisasi tidak dapat dianggap terukur secara langsung dari dataset ini (Scherer, 2004).

Pada siang hari, laju evaporasi yang sangat tinggi di kawasan pesisir menarik larutan garam di dalam pori kapiler menuju permukaan penguapan (*evaporative drying front*). Ketika larutan air pori mencapai kondisi lewat jenuh (*supersaturation*), kristal halit mulai terbentuk di dalam rongga pori mikro plesteran semen (Wons et al., 2025). Tekanan kristalisasi garam hidrolik (p_{crys}) yang ditimbulkan oleh pertumbuhan kristal terkurung dihitung dapat melampaui kuat tarik batas (*tensile strength*) plesteran mortar semen-pasir (0,5–1,2 MPa) (Scherer, 2004). Hal ini menyebabkan degradasi fisik berupa keretakan mikro (*micro-cracking*), pelepasan butiran pasir (*spalling*), dan pembentukan bubuk putih pada dasar dinding (*crypto-efflorescence*), yang menjelaskan kerapuhan mekanis dinding di kawasan pesisir terlepas dari rendahnya aktivitas jamur.

Evaluasi Kinerja Arsitektur Edge Computing dan Implikasi Ketahanan Bangunan

Penerapan komputasi lokal (*edge computing*) pada node ESP32 menunjukkan efisiensi operasional pada konfigurasi yang diuji dalam jaringan pemantauan WSN lapangan. Dengan mengeksekusi komputasi lokal parameter turunan (T_{dew} , ΔT , RH_{surface} , dan laju diferensial M_t harian), node IoT hanya mentransmisikan payload data tervalidasi setiap 5 menit serta memicu transmisi asinkron saat anomali $\Delta T \leq 1,0$ °C terdeteksi. Pendekatan ini mereduksi volume transmisi data seluler sebesar 83,3% dibandingkan skema pengiriman data mentah kontinu berfrekuensi 10 detik, sekaligus memperpanjang efisiensi alokasi bandwidth dan daya perangkat (Naing et al., 2026).

Waktu latensi dari deteksi peristiwa kondensasi antarmuka hingga penerbitan sinyal peringatan (*alert*) pada sistem telemetri tercatat kurang dari 2,4 detik. Angka reduksi transmisi 83,3% dan latensi <2,4 detik dipertahankan sebagai hasil sistem yang dilaporkan. Namun, karena baseline eksperimental, konfigurasi pembanding, dan prosedur pengukuran tidak dijelaskan secara rinci dalam naskah sumber, angka tersebut ditafsirkan sebagai kinerja konfigurasi uji dan bukan sebagai estimasi universal keunggulan edge computing. Literatur IoT/edge mendukung arah manfaat yang sama, tetapi tidak digunakan untuk menggantikan baseline penelitian ini (Abner et al., 2022; Roostaei et al., 2023).

Temuan komparatif empiris ini menegaskan perlunya perubahan paradigma perancangan standar selubung bangunan (*building code*) pada permukiman tropis dengan topografi mikro ekstrem. Bangunan perumahan di kawasan pesisir memerlukan perlindungan primer berupa cat hidrofobik tahan garam (*silane/siloxane water-repellent sealers*) dan mortar kedap air

berkepadatan tinggi untuk menahan penetrasi garam klorida. Sebaliknya, bangunan perumahan di kawasan dataran tinggi memerlukan desain ventilasi silang yang terkendali, integrasi insulasi termal selektif untuk mempertahankan T_{wall} di atas titik embun nokturnal, serta aplikasi pelapis dinding yang mengandung bahan biosit anti-jamur berspektrum luas untuk memutus siklus akumulasi indeks VTT secara permanen.

Temuan penelitian ini perlu dibaca dalam batasan satu periode observasi selama 30 hari, dua klaster perumahan, satu tipe rumah dan satu orientasi dinding, serta dokumentasi replikasi yang belum lengkap dalam naskah sumber. Sinyal elektroda dilaporkan sebagai voltase ADC sehingga berfungsi sebagai proksi konduktivitas/kelembapan relatif dan bukan pengukuran kadar air absolut. Selain itu, mekanisme kristalisasi garam dan kolonisasi jamur tidak diverifikasi melalui XRD, kromatografi ion, atau pemeriksaan mikrobiologis/mikroskopis terstandar. Karena data deret waktu mentah tidak tersedia dalam naskah yang direvisi, grafik yang disajikan menggunakan nilai ringkasan dan tonggak yang dilaporkan, bukan rekonstruksi observasi mentah. Keterbatasan ini membatasi generalisasi hasil dan menunjukkan perlunya replikasi multi-rumah, multi-musim, dan validasi material pada penelitian berikutnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini mendemonstrasikan evaluasi komparatif kinetika higrotermal antarmuka dan risiko biodegradasi selubung bangunan pasangan bata pada Perumahan ABC di pesisir dan Perumahan XYZ di dataran tinggi Ciremai menggunakan arsitektur Wireless Sensor Network terintegrasi edge computing. Pemantauan telemetri kontinu selama 30 hari menunjukkan bahwa Perumahan XYZ mengalami kondisi kondensasi kapiler persisten selama rata-rata $7,8 \pm 1,6$ jam per hari dengan kelembapan relatif permukaan $88,7 \pm 5,2\%$ dan akumulasi indeks jamur VTT $2,45 \pm 0,31$. Perumahan ABC mencatat akumulasi jamur $0,12 \pm 0,05$, namun menunjukkan pola degradasi non-biologis yang konsisten dengan kristalisasi garam siklik. Integrasi komputasi psikrometrik lokal mereduksi volume transmisi data sebesar 83,3% dengan waktu latensi kurang dari 2,4 detik. Temuan ini mendukung pemeliharaan prediktif serta pemilihan material adaptif iklim. Temuan penelitian perlu dibaca dalam batasan satu periode observasi, dua klaster perumahan, satu tipe rumah dan satu orientasi dinding, serta dokumentasi replikasi yang belum lengkap dan validasi material pada penelitian berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abner, M., Wong, P. K.-Y., & Cheng, J. C. P. (2022). Battery lifespan enhancement strategies for edge computing-enabled wireless Bluetooth mesh sensor network for structural health monitoring. *Automation in Construction*, 140, 104355. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104355>
- Bayat Pour, M., Niklewski, J., Naghibi, A., & Fröhwald Hansson, E. (2024). A literature review of probabilistic hygrothermal assessment for building envelopes. *Building and Environment*, 261, 111756. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111756>
- Bourdeau, M., Waeytens, J., Aouani, N., Basset, P., & Nefzaoui, E. (2023). A Wireless Sensor Network for Residential Building Energy and Indoor Environmental Quality Monitoring: Design, Instrumentation, Data Analysis and Feedback. *Sensors*, 23(12), 5580. <https://doi.org/10.3390/s23125580>
- Desai, S., Manapragada, N. V. S. K., Shukla, A. K., & Pignatta, G. (2022). Mould-Growth

- Study in Building Materials Exposed to Warm and Humid Climate Using Heat and Mass Transfer (HAMT) EnergyPlus Simulation Method. *Sustainability*, 14(14), 8292. <https://doi.org/10.3390/su14148292>
- Hall, C., & Hoff, W. (2021). *Water transport in brick, stone and concrete*.
- Joshima, V. M., & Naseer, M. A. (2022). Temperature Gradient across Masonry Walls under Transient Conditions: Case Studies from a Warm Humid Climate. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 103(2), 663–675. <https://doi.org/10.1007/s40030-022-00633-5>
- L. Cabrera, P., Baker, K., & Samuelson, H. (2026). Uncovering Future Mold Risk in Existing Residential Walls with Climate Change. *Buildings*, 16(13), 2643. <https://doi.org/10.3390/buildings16132643>
- Li, W., Shen, G., Zhang, J., Liu, D., & Choi, C. (2023). A LoRaWAN monitoring system for large buildings based on embedded edge computing in indoor environment. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 35(16). <https://doi.org/10.1002/cpe.6306>
- Majeed, A., Zhang, Y., Ren, S., Lv, J., Peng, T., Waqar, S., & Yin, E. (2021). A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing. *Robotics Comput. Integr. Manuf.*, 67. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2020.102026>
- Marwan, N. (2026). Material Arsitektur. *Books.Google.Com*.
- Mishra, M., Lourenço, P. B., & Ramana, G. V. (2022). Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *Journal of Building Engineering*, 48, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103954>
- Murtyas, S., Minami, Y., Handayani, K. N., & Hagishima, A. (2023). Assessment of Mould Risk in Low-Cost Residential Buildings in Urban Slum Districts of Surakarta City, Indonesia. *Buildings*, 13(5), 1333. <https://doi.org/10.3390/buildings13051333>
- Naing, A. M., Al-Hamid, D. Z., & Singh, A. (2026). An Integrated IoT-Based Multi-Sensor Framework for Real-Time Indoor Environment and Safety Monitoring. *Sensors*, 26(12), 3702. <https://doi.org/10.3390/s26123702>
- Qiao, J., Zhang, X., Xiao, F., Li, Y., & Gao, W. (2024). Experimental investigation of mold growth risk among typical residential indoor materials: Case study in coastal city, China. *Energy and Buildings*, 304, 113885. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113885>
- Roostaei, J., Wager, Y. Z., Shi, W., Dittrich, T., Miller, C., & Gopalakrishnan, K. (2023). IoT-based edge computing (IoTEC) for improved environmental monitoring. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 38, 100870. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100870>
- Scherer, G. W. (2004). Stress from crystallization of salt. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1613–1624. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.034>
- Sedlbauer, K. (2001). Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components. *Publica-Rest.Fraunhofer.De*.
- Tsang, T.-W., Mui, K.-W., Wong, L.-T., Chan, A. C.-Y., & Chan, R. C.-W. (2024). Real-Time Indoor Environmental Quality (IEQ) Monitoring Using an IoT-Based Wireless Sensing Network. *Sensors*, 24(21), 6850. <https://doi.org/10.3390/s24216850>
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics*, 33(3), 201–224. <https://doi.org/10.1177/1744259109343511>

Wons, W., Kłosek-Wawrzyn, E., & Rzepa, K. (2025). Corrosion of Porous Building Ceramics Caused by Double Sulphate Salt. *Materials*, 18(5), 1041. <https://doi.org/10.3390/ma18051041>