

Audit Retrospektif Kinerja Chiller Tanpa Bas: Validasi Data Ultrasonik Portabel Dan Deteksi Anomali Yang Dapat Dijelaskan

Aldi Cahya Muhammad^{1*}, Budiman R Saragih², Rinto Dwi Pambela³

^{1,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Dian Nusantara, Bekasi, Provinsi Jawa Barat, Indonesia.

² Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia KEBTKE, Daerah Khusus Ibukota Jakarta, Indonesia

Corresponding Email: aldi.cahya.muhammad@dosen.undira.ac.id^{1*}

Histori Artikel:

Dikirim 15 Agustus 2026; *Diterima dalam bentuk revisi* 21 Agustus 2026; *Diterima* 26 Agustus 2026; *Diterbitkan* 28 September 2026. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Chiller pada gedung pemerintah di wilayah beriklim tropis sering beroperasi tanpa sistem otomasi gedung (*building automation system*, BAS), sehingga penurunan kinerjanya sulit terdeteksi melalui pemantauan rutin. Penelitian ini menganalisis kembali dataset pengukuran lapangan 2024 pada satu chiller sentrifugal berpendingin air 500 TR (R134a) di kantor pemerintah kota tanpa pengambilan data baru. Model *Isolation Forest* dengan atribusi *SHAP* berbasis permutasi digunakan untuk menandai kejadian laju alir nol dan pembacaan di sekitarnya, dengan residual terhadap tren lokal sebagai fitur penjelas utama. Segmen flatline berkepanjangan setelah kejadian nol terlewat, melengkapi penapisan manual. Proporsi penandaan berkisar 6,2% hingga 6,5% per sesi dengan parameter kontaminasi 0,06. Pemeriksaan pipa memulihkan diameter stabil di tiga lokasi, yaitu 240 mm, 97,7 mm, dan 450 mm, serta mengoreksi kesalahan pelabelan. Perhitungan ulang menunjukkan kalor evaporator $825,5 \pm 79,7$ kW dan *COP* aktual $3,75 \pm 0,36$, dibandingkan dengan *COP* rancangan 5,76 pada beban terukur 47,2% kapasitas. Deviasi neraca kalor mencapai 11,6%, melampaui ambang 5%. Ketidakseimbangan ini mencerminkan ketidakpastian gabungan, dengan daya spesifik 0,94 kW/TR dan TTD 1,3 °C, konsisten dengan hambatan termal tambahan yang belum terverifikasi.

Kata Kunci: Audit Kinerja Chiller; Analisis Retrospektif; Ketidakpastian Pengukuran; *Isolation Forest*; *SHAP*.

Abstract

Chillers in government buildings located in tropical climates often operate without a building automation system (BAS), making performance degradation difficult to detect through routine monitoring. This study reanalyzes the 2024 field measurement dataset for a 500 TR (R134a) water-cooled centrifugal chiller in a city government office without new data collection. The *Isolation Forest* model interpreted with permutation-based *SHAP* attribution marks instances of zero flow rate and surrounding reading changes, with residuals against local trends as the primary explanatory feature. Extended flatline segments following zero events are overlooked, complementing rather than replacing manual screening. The marking proportion ranges from 6.2% to 6.5% per session, adhering to a contamination parameter of 0.06. Pipe cross-section examinations restore stable diameters at three locations: 240 mm, 97.7 mm, and 450 mm, correcting a labeling error. Recalculated results show evaporator heat of 825.5 ± 79.7 kW and an actual *COP* of 3.75 ± 0.36 compared to a design *COP* of 5.76 at a measured load of 47.2% capacity. The energy balance deviation reaches 11.6%, exceeding the 5% threshold. This imbalance reflects combined uncertainty, with specific power at 0.94 kW/TR and a temperature difference of 1.3 °C, consistent with additional thermal resistance yet to be verified.

Keyword: Chiller Performance Audit; Retrospective Analysis; Measurement Uncertainty; *Isolation Forest*; *SHAP*.

1. Pendahuluan

Chiller sentrifugal berpendingin air termasuk konsumen listrik terbesar pada gedung komersial dan gedung pemerintah di Indonesia. Efisiensi operasinya dalam jangka panjang banyak ditentukan oleh pengotoran penukar kalor, terutama pada berkas pipa evaporator (Marbun *et al.*, 2025). Endapan menumpuk perlahan dan hampir tidak terlihat tanpa membuka *shell*, sehingga keberadaannya umumnya dikenali secara tidak langsung. Indikator yang lazim dipakai adalah melebarnya jarak antara temperatur saturasi refrigeran dan temperatur air dingin yang meninggalkan evaporator. Jarak itu dikenal sebagai selisih temperatur terminal (*terminal temperature difference*, TTD), dan pelebarannya biasanya berjalan seiring turunnya COP terukur terhadap nilai rancangan pabrik.

Sebagian besar penelitian mutakhir tentang deteksi dan diagnosis kegagalan (*fault detection and diagnosis*, FDD) pada chiller bertumpu pada aliran data kontinu dari BAS, sistem *supervisory control and data acquisition* (SCADA), atau model simulasi dinamis yang dikalibrasi terhadap rekaman historis panjang. (Aguilera *et al.*, 2023) menyusun pemantauan berbasis model adaptif untuk pompa kalor skala besar yang rentan terhadap pengotoran evaporator. (Mauro *et al.*, 2023) menelaah degradasi kinerja pompa kalor sumber udara pada kondisi operasi terganggu memakai data yang direkam kontinu. Penelitian FDD berbasis pembelajaran mesin juga terus meluas, mencakup deteksi anomali (Parsaei *et al.*, 2024), jaringan saraf konvolusional dengan *knowledge distillation* (Gao *et al.*, 2023), strategi penarikan data untuk kondisi data langka (Ren *et al.*, 2023), *variational autoencoder* dengan kerangka *co-training* (Lu dkk., 2024), dan kerangka pemilihan fitur (Wang dkk., 2024). Perkembangan terbaru menambahkan ekstraksi fitur mendalam (Han *et al.*, 2025), diagnosis adaptif pada lift chiller (Guo *et al.*, 2025), serta penyempurnaan prosedur pemilihan fitur (Wang *et al.*, 2025). Tinjauan Ssembatya dan Claridge (2024) mencatat bahwa mayoritas metode itu masih mensyaratkan data bersih, kontinu, dan cukup panjang dari sensor permanen.

Cabang literatur lain menerapkan deteksi anomali tanpa penyeliaan berbasis pohon langsung pada data lapangan atau data BAS yang bising. (Bi *et al.*, 2024), dalam tinjauan sistematis FDD HVAC berbasis kecerdasan buatan periode 2013 sampai 2023, mencatat bahwa metode *ensemble* berbasis pohon masih paling banyak dipakai untuk penapisan kegagalan sensor di lapangan karena tidak memerlukan label kegagalan dan cukup toleran terhadap masukan yang tidak teratur serta tidak stasioner. (Liang *et al.*, 2023) membuktikannya pada chiller: tahap pra-penyaringan dengan Isolation Forest meningkatkan sensitivitas deteksi kegagalan sensor berbasis PCA dan kernel PCA karena pembacaan pencila disingkirkan sebelum model dilatih. (Yan, 2021) serta (Yan & Zhou, 2022) menyusun kerangka FDD chiller tanpa penyeliaan dan semi-penyeliaan untuk kondisi ketika data kegagalan berlabel lengkap tidak tersedia, kondisi yang lebih menggambarkan audit lapangan daripada pengujian laboratorium.

Persoalan berikutnya muncul pada sisi penafsiran. Penanda anomali tanpa penyeliaan hanya menyatakan bahwa suatu pembacaan tidak wajar tanpa menjelaskan penyebabnya. (Srinivasan *et al.*, 2021) menilai ketertutupan itu sebagai penghambat utama kepercayaan operator terhadap diagnostik chiller berbantuan kecerdasan buatan, dan menunjukkan bahwa pemaduan model deteksi kegagalan dengan penjelasan pada tingkat fitur meningkatkan kesediaan praktisi menindaklanjuti keluaran model. Teknik *explainable artificial intelligence* (XAI), khususnya *Shapley Additive Explanations* (SHAP), telah diterapkan pada pengklasifikasi kegagalan *air handling unit* (Meas *et al.*, 2022) dan ditinjau luas untuk manajemen energi bangunan (Chen *et al.*, 2023). (Kaushik & Naik, 2024) memperlihatkan bahwa penggabungan penapisan anomali ringan dengan atribusi penyebab dapat memangkas waktu diagnosis teknisi pada audit sistem pendingin.

Asumsi ketersediaan data kontinu dari BAS tidak sejalan dengan kenyataan operasional banyak gedung publik di negara berkembang. Chiller di sana kerap dioperasikan tanpa BAS permanen dan tanpa *metering* laju alir maupun energi termal tersendiri, sehingga penilaian kinerja bergantung pada rekaman berdurasi pendek dari instrumen jepit portabel (Almobarek, 2024; Keyence Corporation, 2024). Dari sisi regulasi, SNI 6390:2020 menetapkan persyaratan efisiensi minimum bagi chiller sentrifugal berpendingin air dan searah dengan ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016

(ASHRAE, 2016; Badan Standardisasi Nasional, 2020). Kedua standar bertumpu pada kinerja terukur pabrikan saat pemilihan peralatan, sehingga belum menjawab apakah chiller tetap bekerja mendekati efisiensi terukurnya setelah beroperasi bertahun-tahun pada beban gedung yang sebenarnya.

Celah yang tersisa karena itu bersifat ganda. Pertama, literatur FDD hampir seluruhnya dibangun di atas data kontinu, sementara dataset lapangan berdurasi pendek dari instrumen portabel jarang dianalisis secara sistematis, termasuk persoalan kualitas datanya. Kedua, pemanfaatan kembali dataset lapangan yang sudah tersedia untuk penilaian kinerja retrospektif belum banyak didokumentasikan sebagai prosedur yang dapat diperiksa ulang. Rumusan masalah penelitian ini mengikuti kedua celah itu: sejauh mana dataset pengukuran lapangan berdurasi pendek dapat divalidasi secara fisik dan dipakai untuk menilai kinerja chiller, serta sejauh mana lapisan deteksi anomali yang dapat dijelaskan mampu menapis dan menerangkan artefak sensor di dalamnya tanpa data kegagalan berlabel.

Penelitian ini menganalisis kembali dataset primer hasil pengukuran lapangan tahun 2024 pada satu unit chiller sentrifugal berpendingin air 500 TR di sebuah gedung pemerintah kota. Seluruh pengukuran dilakukan pada 2024 dan terdokumentasi dalam laporan evaluasi lapangan beserta rekaman mentahnya. Penelitian saat ini tidak melakukan pengukuran, kunjungan lapangan, maupun inspeksi fisik baru. Tujuannya ada empat: (1) memvalidasi konsistensi fisik rekaman laju alir ultrasonik melalui hubungan laju alir dan kecepatan; (2) menghitung ulang neraca kalor serta COP aktual berikut anggaran ketidakpastian pengukurannya, lalu membandingkan hasilnya dengan spesifikasi rancangan, SNI 6390:2020, dan ASHRAE 90.1-2016; (3) menapis artefak kualitas data pada tingkat sensor memakai Isolation Forest tanpa penyeliaan (Liu *et al.*, 2008) yang ditafsirkan dengan atribusi SHAP berbasis permutasi (Lundberg & Lee, 2017); dan (4) merumuskan implikasi metodologis bagi audit chiller berbasis instrumen portabel. Kontribusinya terletak pada analisis, validasi fisik, dan penafsiran teknis atas data lapangan nyata, bukan pada penambahan pengukuran.

Atribusi pada tingkat fitur diperoleh memakai *explainer* SHAP berbasis permutasi (Lundberg & Lee, 2017) yang diterapkan langsung pada fungsi skor anomali model terlatih, dengan sampel latar acak hingga 30 pembacaan dalam sesi yang sama. Pilihan ini disengaja. Isolation Forest bukan model regresi maupun peramalan, sehingga *explainer* mengatribusikan skor anomali kepada setiap fitur masukan dan bukan kepada nilai laju alir prediksi. Dengan cara itu, penjelasan yang dilaporkan tetap terikat pada besaran yang benar-benar dihitung algoritme.

Batas tafsir atas keluaran SHAP dipisahkan menjadi tiga tingkat. Pola teramati adalah apa yang terlihat pada rekaman. Atribusi model adalah bobot fitur yang dihasilkan *explainer* atas skor anomali. Penafsiran teknis adalah dugaan penyebab fisik yang diajukan penulis berdasarkan kedua hal itu. SHAP menjelaskan perilaku model, bukan membuktikan sebab fisik, sehingga tidak ada klaim kausal yang ditarik langsung dari nilai atribusi. Pada seluruh gambar hasil, garis tren rujukan lokal yang diplot merupakan rata-rata bergerak lima titik sebagai konteks visual, bukan keluaran model dan bukan objek yang dijelaskan atribusi SHAP.

2. Metode Penelitian

2.1 Rancangan Penelitian dan Sumber Data

Penelitian ini berbentuk analisis retrospektif studi kasus tunggal atas dataset primer yang telah tersedia. Dataset berasal dari pengukuran lapangan aktual pada tahun 2024 di sebuah gedung perkantoran pemerintah kota, bukan dari simulasi, data sintetis, maupun pengukuran pihak ketiga yang dipublikasikan. Bahan analisis terdiri atas rekaman mentah *flow meter* ultrasonik berikut laporan evaluasi lapangan 2024 yang memuat temperatur air, daya kompresor, dan hasil perhitungan tim lapangan. Penegasan berikut diperlukan agar cakupan penelitian tidak disalahartikan: tidak ada kampanye pengukuran, kunjungan lapangan, pembongkaran pipa, maupun uji pembersihan yang dilakukan untuk penelitian ini. Seluruh angka pengukuran berasal dari kegiatan 2024. Objek yang diaudit adalah satu unit chiller sentrifugal berpendingin air 500 TR dengan refrigeran R134a. Unit

ini bekerja pada satu *plant* yang juga memuat satu unit 500 TR lain dan satu unit 325 TR. Kapasitas pendinginan dan daya listrik rancangan unit 500 TR berturut-turut 1.750 kW dan 304 kW, setara COP rancangan 5,76 atau 0,44 kW/TR, sedangkan unit 325 TR dirancang pada 1.137 kW dan 198 kW dengan COP 5,74. Gedung memiliki pola hunian satu *shift* yang relatif terduga dan, pada saat pengukuran 2024, belum dilengkapi BAS maupun platform manajemen energi. Konteks operasional inilah, bukan laboratorium atau gedung komersial berpemantauan kontinu, yang diwakili penelitian ini.

2.2 Dataset dan Parameter Pengukuran

Pengukuran 2024 memakai *flow meter* ultrasonik *clamp-on* portabel, yaitu instrumen *transit-time* non-invasif yang tidak memerlukan pemotongan pipa (Emerson Electric Co, 2024; Keyence Corporation, 2024), yang dipasang pada perpipaan air evaporator dan kondensor. Temperatur air masuk dan keluar dicatat bersamaan, sedangkan daya listrik kompresor dibaca dari panel lokal chiller. Rekaman laju alir tersimpan otomatis pada interval 5 detik dan memuat kanal laju alir, kecepatan fluida, satuan tampilan, serta stempel waktu. Parameter lain yang dipakai dalam perhitungan, yakni laju alir kondensor unit yang diaudit, temperatur air, daya kompresor, dan TTD evaporator, hanya tersedia sebagai nilai tunggal dalam laporan evaluasi lapangan tanpa rekaman berfrekuensi tinggi. Laporan evaluasi lapangan 2024 tidak mencantumkan merek, tipe, nomor seri, maupun sertifikat kalibrasi instrumen yang dipakai, dan hanya menyebut kelasnya sebagai *flow meter* ultrasonik *clamp-on transit-time*.

2.3 Spesifikasi Instrumen dan Anggaran Ketidakpastian

Meter ultrasonik *clamp-on transit-time* untuk cairan pada pipa terisi penuh umumnya dispesifikasikan pada rentang $\pm 1\%$ sampai $\pm 3\%$ pembacaan ketika faktor pipa diketahui dan profil aliran telah berkembang, dengan keberulangan yang lebih baik daripada akurasi absolutnya (Emerson Electric Co, 2024; ISO, 2012). Penelitian ini memakai nilai tengah rentang tersebut, yaitu $\pm 2\%$ pembacaan, sebagai ketidakpastian baku relatif laju alir volumetrik. Pilihan itu didukung kondisi rekaman: kecepatan fluida terukur berada pada 1,44 sampai 1,92 m/detik, jauh di atas batas bawah tempat akurasi meter jepit mulai merosot, sehingga asumsi kelas alat masih wajar diterapkan pada jendela stabil.

Temperatur air dicatat memakai sensor lapangan tanpa dokumentasi kalibrasi. Ketidakpastian baku tiap pembacaan diandaikan $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, setara sensor lapangan kelas A yang terpasang pada perpipaan. Karena ΔT merupakan selisih dua pembacaan yang tidak berkorelasi, ketidakpastiannya menjadi $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$, yaitu $9,4\%$ terhadap ΔT evaporator $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan $6,9\%$ terhadap ΔT kondensor $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Angka inilah, bukan akurasi meter aliran, yang mendominasi ketidakpastian kalor pada sisi evaporator. Daya kompresor dibaca dari panel lokal dan diberi ketidakpastian $\pm 1\%$. Seluruh asumsi dirangkum pada Tabel 1 dan diperlakukan sebagai ketidakpastian tipe B menurut kerangka GUM (JCGM, 2008).

Tabel 1. Anggaran ketidakpastian pengukuran yang dipakai dalam perhitungan ulang

Besaran	Sumber ketidakpastian	Nilai baku ($k = 1$)	Catatan
Laju alir volumetrik	Batas akurasi kelas meter ultrasonik <i>clamp-on transit-time</i>	$\pm 2,0\%$ pembacaan	Kecepatan terukur 1,44 - 1,92 m/detik, di atas batas bawah kelas alat
Temperatur air (tiap pembacaan)	Sensor lapangan tanpa sertifikat kalibrasi	$\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$	Setara sensor lapangan kelas A
Beda temperatur ΔT	Gabungan dua pembacaan tak berkorelasi	$\pm 0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$	$9,4\%$ pada ΔT evaporator $3\text{ }^{\circ}\text{C}$; $6,9\%$ pada ΔT kondensor $4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Kerapatan dan kalor jenis air	Nilai tabel sifat pada rentang $8\text{--}32\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5\%$	Sumber kecil, tetap disertakan

Daya listrik kompresor	Pembacaan panel lokal tanpa kelas alat ukur	$\pm 1,0\%$	Masuk hanya ke perhitungan COP
------------------------	---	-------------	--------------------------------

Seluruh nilai merupakan ketidakpastian tipe B yang diturunkan dari spesifikasi kelas alat dan praktik instrumentasi lapangan, bukan dari sertifikat kalibrasi unit yang dipakai pada 2024.

2.4 Kendali Kualitas Data dan Prapemrosesan

Rekaman mentah memuat dua jenis gangguan yang khas pada instrumen jepit portabel, yaitu pembacaan laju alir nol dan pergantian satuan tampilan secara otomatis di tengah sesi, misalnya dari m^3/jam ke g/h dan g/m , atau dari g/min ke L/s . Prapemrosesan karena itu dijalankan dalam tiga langkah. Pertama, pembacaan laju alir nol ditapis dan dibuang. Kedua, segmen yang satuan tampilannya berubah tanpa disertai peristiwa aliran fisik ditandai sebagai artefak sensor, bukan transien nyata. Ketiga, jendela pengukuran stabil yang bersinambung, yakni rangkaian pembacaan dengan satuan konsisten dan variabilitas relatif rendah, dipilih sebagai dasar perhitungan rata-rata laju alir beserta simpangan bakunya.

2.5 Validasi Konsistensi Fisik

Dua dari tiga rekaman memuat pembacaan bersatuan tampilan g/m yang ambigu antara laju massa harfiah, yaitu gram per menit, dan artefak *firmware* yang salah melabeli pembacaan volumetrik L/menit . Alih-alih memilih salah satunya sebagai asumsi, penelitian ini memakai pemeriksaan konsistensi fisik. Meter jepit melaporkan laju alir dan kecepatan rata-rata fluida dari pengukuran *transit-time* akustik yang sama, sehingga pada pipa berpenampang tetap luas penampang terimplikasi menurut Persamaan (1) seharusnya konstan antarpembacaan, terlepas dari satuan yang dipilih *firmware*.

$$A = Q / v \quad (1)$$

Simbol A menyatakan luas penampang pipa (m^2), Q menyatakan laju alir volumetrik (m^3/detik), dan v menyatakan kecepatan rata-rata fluida (m/detik). Pada setiap sesi, nilai A dihitung untuk seluruh pembacaan yang tidak bernilai nol dan tidak tergolong anomali, lalu mediannya dikonversi menjadi diameter pipa ekuivalen. Konversi satuan yang menghasilkan diameter stabil dan masuk akal secara fisik sepanjang sesi dipertahankan untuk analisis kuantitatif, sedangkan segmen yang gagal memenuhi syarat itu diperlakukan sebagai data tidak andal.

2.6 Penilaian Kinerja Chiller

Kalor evaporator dan kondensor dihitung dengan persamaan neraca kalor sensibel berikut.

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (2)$$

Simbol $\dot{m}$ mewakili laju aliran massa yang diukur dengan densitas air $1.000 \text{ kg}/\text{m}^3$, C_p mewakili panas spesifik air pada $4,1 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ sesuai dengan nilai yang digunakan dalam evaluasi lapangan 2024, dan ΔT mewakili perbedaan suhu air pada setiap penukar panas. Penyimpangan dari neraca kalor dinilai menggunakan dua rumus, yang keduanya dilaporkan secara terbuka, karena hanya satu rumus yang ditemukan menjadi sumber ambiguitas dalam laporan 2024. Persamaan (3) secara langsung membandingkan dua panas yang dihitung. Persamaan (4) mengikuti kerangka penilaian AHRI 550/590 dengan memasukkan kerja kompresor di sisi kondensor, karena panas kondensor pada dasarnya mendekati panas evaporator ditambah kerja kompresor (AHRI, 2023). Ambang penerimaan 5% diterapkan pada keduanya.

$$\delta Q = (Q_{\text{cond}} - Q_{\text{evap}}) / Q_{\text{cond}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\delta \text{EB} = (Q_{\text{evap}} + P_{\text{kompresor}} - Q_{\text{cond}}) / (Q_{\text{evap}} + P_{\text{kompresor}}) \times 100\% \quad (4)$$

Angka deviasi 2,24% pada laporan evaluasi lapangan 2024 tidak dapat direproduksi dari data yang tersedia karena langkah antaranya tidak terdokumentasi. Oleh karena itu, studi ini mengutip angka-angka tersebut sebagai pernyataan dari laporan lapangan dan tidak menggunakannya sebagai hasil verifikasi. Kriteria kami adalah hasil dari Persamaan (3) dan (4) beserta ketidakpastiannya, dan konsekuensi dari pilihan ini terhadap status validitas data dibahas dalam Subbagian 3.2. Ketidakpastian gabungan dari setiap panas dihitung menggunakan hukum propagasi untuk kuantitas yang tidak berkorelasi.

$$u(Q)/Q = \sqrt{[(u(V)/V)^2 + (u(\Delta T)/\Delta T)^2 + (u(Cp)/Cp)^2]} \quad (5)$$

COP aktual dihitung sebagai rasio kalor pendinginan evaporator terhadap daya listrik kompresor terukur.

$$COP_{aktual} = Q_{evap} / P_{kompresor} \quad (6)$$

TTD dari evaporator, yaitu perbedaan antara suhu saturasi refrigeran dan suhu air dingin yang keluar dari evaporator, diambil dari laporan evaluasi lapangan 2024. TTD juga digunakan dengan perbedaan COP sebagai indikator tidak langsung pada tingkat penyaringan tanpa inspeksi fisik pipa. Hasilnya dibandingkan dengan SNI 6390:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020) dan Standar ANSI/ASHRAE/IES 90.1-2016 (ASHRAE, 2016), serta data kinerja pabrikan bersertifikat AHRI untuk unit serupa (Model HTS087M, R134a) seperti yang dikutip dalam laporan evaluasi lapangan 2024. Agar tidak membuat perbandingan yang menyesatkan, fraksi beban selama pengukuran juga dihitung sebagai rasio panas evaporator terhadap kapasitas terpasang karena COP desain berlaku dalam kondisi penilaian beban penuh.

2.7 Deteksi Anomali Berbasis Isolation Forest

Setelah normalisasi satuan, ketiga rekaman dianalisis terpisah memakai model Isolation Forest tanpa penyeliaan (Liu dkk., 2008) pada pustaka *scikit-learn*. Model ini dipilih karena tidak memerlukan contoh kegagalan berlabel, toleran terhadap rekaman lapangan pendek yang bercampur dan tidak stasioner, serta terbukti menaikkan sensitivitas deteksi kegagalan sensor chiller ketika dipakai sebagai tahap pra-penyaringan (Liang dkk., 2023) dan sebagai lapisan penapisan ringan tanpa label pada aliran data sensor bangunan (Bi dkk., 2024). Lima fitur direkayasa dari kanal laju alir dan kecepatan yang telah dinormalisasi, yaitu (1) nilai laju alir sesaat; (2) nilai mutlak selisih pertama antarpembacaan berurutan, yang menangkap perubahan langkah mendadak; (3) simpangan baku bergerak lima titik, yang menangkap volatilitas lokal; (4) residual mutlak antara nilai sesaat dan rata-rata bergerak terpusat lima titik, yang menangkap simpangan jangka pendek terhadap tren lokal; serta (5) rasio laju alir terhadap kecepatan, yang peka terhadap artefak konversi satuan. Setiap model dilatih memakai 200 pohon, parameter kontaminasi 0,06, dan *seed* acak tetap agar hasilnya dapat direproduksi. Pelatihan dan penyekoran berjalan per sesi tanpa penggabungan antarsesi maupun pelabelan berpenyeliaan.

Satu konsekuensi parameter perlu dinyatakan di muka. Kontaminasi 0,06 menetapkan ambang skor sedemikian rupa sehingga sekitar 6% pembacaan per sesi pasti ditandai, terlepas dari kondisi datanya. Proporsi anomali karena itu bukan temuan empiris, melainkan konsekuensi aritmetika dari parameter yang dipilih. Nilai 0,06 dipakai sebagai perkiraan awal proporsi artefak sensor dan tidak disetel terhadap *ground truth* mana pun, sebab dataset ini memang tidak memiliki label anomali. Keluaran yang dapat ditafsirkan adalah lokasi pembacaan yang ditandai dan bobot fitur yang menjelaskannya, bukan persentasenya.

2.8 Analisis Explainable AI dengan SHAP

Atribusi pada tingkat fitur diperoleh memakai *explainer* SHAP berbasis permutasi (Lundberg & Lee, 2017) yang diterapkan langsung pada fungsi skor anomali model terlatih, dengan sampel latar acak hingga 30 pembacaan dalam sesi yang sama. Pilihan ini disengaja. Isolation Forest bukan

model regresi maupun peramalan, sehingga explainer mengatribusikan skor anomali kepada setiap fitur masukan dan bukan kepada nilai laju alir prediksi. Dengan cara itu, penjelasan yang dilaporkan tetap terikat pada besaran yang benar-benar dihitung algoritme. Batas tafsir atas keluaran SHAP dipisahkan menjadi tiga tingkat. Pola teramati adalah apa yang terlihat pada rekaman. Atribusi model adalah bobot fitur yang dihasilkan explainer atas skor anomali. Penafsiran teknis adalah dugaan penyebab fisik yang diajukan penulis berdasarkan kedua hal itu. SHAP menjelaskan perilaku model, bukan membuktikan sebab fisik, sehingga tidak ada klaim kausal yang ditarik langsung dari nilai atribusi. Pada seluruh gambar hasil, garis tren rujukan lokal yang diplot merupakan rata-rata bergerak lima titik sebagai konteks visual, bukan keluaran model dan bukan objek yang dijelaskan atribusi SHAP.

2.9 Alur Kerja Penelitian

Analisis berjalan dalam enam tahap berurutan. Tahap pertama menyiapkan rekaman mentah 2024 dan laporan evaluasi lapangan sebagai masukan. Tahap kedua menjalankan prapemrosesan. Tahap ketiga memvalidasi konsistensi fisik melalui luas penampang pipa dan memutuskan konversi satuan yang ambigu. Tahap keempat menghitung neraca kalor, COP, fraksi beban, dan TTD. Tahap kelima merambatkan ketidakpastian pengukuran ke seluruh besaran turunan tersebut. Tahap keenam menjalankan Isolation Forest per sesi berikut atribusi SHAP. Tahap ketujuh menafsirkan hasil terhadap standar dan literatur, lalu merumuskan keterbatasan. Urutan ini menempatkan validasi fisik sebelum pemodelan, sehingga masukan bagi model sudah tersaring lebih dahulu.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

3.1.1 Validasi Fisik Dataset dan Neraca kalor

Tabel 2 meringkas tiga rekaman laju alir ultrasonik mentah dari kampanye 2024, sedangkan Tabel 3 memuat parameter kinerja rancangan dan aktual chiller 500 TR beserta besaran turunan yang dihitung dalam penelitian ini.

Tabel 2. Ringkasan rekaman mentah flow meter ultrasonik portabel dari kampanye pengukuran 2024

Rekaman lokasi	/ Sesi (tanggal, waktu)	n	Rata-rata laju alir $\pm$ SD	Rentang kecepatan (m/detik)	Catatan kualitas data
Evaporator, chiller 500 TR	19 Jul 2024, 11.21-11.23	26	239,57 $\pm$ 2,33 m ³ /jam	1,44-1,51	Jendela stabil, diikuti sekitar 90 detik pergantian satuan otomatis (m ³ /jam $\rightarrow$ g/h $\rightarrow$ g/m) yang dikeluarkan dari analisis
Kondensor ke cooling tower, Chiller 2	19 Jul 2024, 14.23-14.29	36	841,92 $\pm$ 8,76 L/menit*	1,75-1,92	Penurunan bertahap selama sekitar 6 menit, dipertahankan sebagai tren stabil (*satuan tampil sebagai g/m pada perangkat, ditafsirkan sebagai L/menit)
Kondensor ke cooling tower (sesi terpisah)	17 Sep 2024, 11.26-11.43	-	tidak dihitung	0-1,2 (bervariasi)	Kejadian laju alir nol berulang disertai pergantian satuan otomatis (g/min $\leftrightarrow$ L/s), dikeluarkan dari analisis kuantitatif

Catatan: nilai n pada tabel ini adalah jumlah pembacaan di dalam jendela stabil yang dipakai untuk menghitung statistik laju alir, bukan jumlah seluruh pembacaan sesi. Jumlah pembacaan sesi penuh yang dimasukkan ke model deteksi anomali dilaporkan pada Tabel 2, yaitu 138, 65, dan 186 titik untuk ketiga sesi. Sesi 17 September tidak memiliki jendela stabil sehingga statistik laju alirnya tidak dihitung, sedangkan seluruh pembacaannya tetap dianalisis sebagai pola kualitas data.

Rekaman laju alir evaporator memberi rata-rata jendela stabil $239,57 \pm 2,37 \text{ m}^3/\text{jam}$ pada $n = 26$. Nilai ini berselisih kurang dari 1% terhadap laju alir $241,618 \text{ m}^3/\text{jam}$ yang dipakai dalam perhitungan neraca kalor dan COP formal. Laporan lapangan 2024 mencatat statistik jendela stabil $239,57 \pm 2,33 \text{ m}^3/\text{jam}$. Rata-ratanya identik, sedangkan selisih simpangan baku konsisten dengan perbedaan pembagi: simpangan baku populasi 2,33 dikalikan $\sqrt{(26/25)}$ menghasilkan 2,38, mendekati nilai 2,37 yang diperoleh dengan pembagi $n - 1$. Kedua angka karena itu dipertahankan apa adanya dan tidak diperlakukan sebagai ketidakcocokan data. Pemeriksaan luas penampang pipa memberi hasil yang mendukung. Diameter median 240,0 mm konstan pada seluruh 26 pembacaan jendela stabil, yang berarti segmen berlabel m^3/jam mewakili satu kondisi pengukuran yang koheren secara fisik. Kesesuaian antara rekaman mentah, nilai yang diadopsi laporan 2024, dan diameter pipa yang stabil menjadi dasar untuk memperlakukan rekaman evaporator sebagai data yang layak dibawa ke tahap berikutnya.

Tabel 3. Parameter kinerja rancangan dan aktual chiller sentrifugal berpendingin air 500 TR

Parameter	Rancangan (spesifikasi pabrikan)	Aktual (dataset lapangan 2024)
Kapasitas pendinginan	1.750 kW (500 TR)	–
Daya listrik masukan	304 kW	220 kW (kompresor)
Koefisien kinerja (COP)	5,76 (0,44 kW/TR)	$3,75 \pm 0,36$ ($k = 1$)
Laju alir air evaporator	–	$241,618 \text{ m}^3/\text{jam}$ (67,12 L/detik)
Laju alir air kondensor	–	$200 \text{ m}^3/\text{jam}$ (55,56 L/detik)
Temperatur air evaporator (masuk / keluar)	–	$11^\circ\text{C} / 8^\circ\text{C}$ ($\Delta T \approx 3^\circ\text{C}$)
Temperatur air kondensor (masuk / keluar)	–	$28,1^\circ\text{C} / 32,2^\circ\text{C}$ ($\Delta T \approx 4,1^\circ\text{C}$)
Kalor evaporator, Q_{evap}	1.750 kW (terukur pabrikan)	$\approx 825,5 \pm 79,7 \text{ kW}$
Kalor kondensor, Q_{cond}	–	$\approx 933,9 \pm 67,2 \text{ kW}$
Deviasi neraca kalor hasil perhitungan ulang	$< 5\%$ (ambang penerimaan)	$11,6\%$ (Pers. 3) dan $10,7\%$ (Pers. 4); tidak memenuhi ambang
Deviasi neraca kalor menurut laporan lapangan 2024	$< 5\%$ (ambang penerimaan)	$2,24\%$; langkah perhitungan tidak terdokumentasi, dikutip bukan diverifikasi
TTD evaporator (approach)	$\leq 1,0^\circ\text{C}$ (rujukan praktik pemeliharaan)	$1,3^\circ\text{C}$
Fraksi beban terhadap kapasitas terpasang †	100% (kondisi pemeringkatan)	$\approx 47,2\% \pm 4,6\%$
Fraksi daya terhadap daya rancangan †	100%	$\approx 72,4\%$
Daya spesifik †	0,44 kW/TR	$\approx 0,94 \pm 0,09 \text{ kW/TR}$
Implikasi energi listrik pada COP aktual, beban pendinginan sama †	rujukan (0%)	$\approx +53,6\%$

Besaran turunan yang dihitung dalam penelitian ini dari angka pada baris di atasnya, bukan hasil pengukuran tambahan. Label temperatur evaporator ditulis sebagai masuk/keluar agar

konsisten secara fisik; nilai 11 °C dan 8 °C tidak diubah dari laporan lapangan 2024. Rentang ketidakpastian mengikuti anggaran pada Tabel 1 dan dilaporkan pada $k = 1$.

3.1.2 Hasil Pembentukan Aturan Asosiasi

Dari laju aliran, suhu, dan panas spesifik dalam Tabel 3, kita dapat merekonstruksi panas sensibel dari dua penukar panas menggunakan Persamaan (2). Panas evaporator adalah $67,12 \text{ kg/detik} \times 4,1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times 3 ^\circ\text{C}$ atau 825,5 kW dan panas kondensor adalah $55,56 \text{ kg/detik} \times 4,1 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \times 4,1 ^\circ\text{C}$ atau sekitar 933,9 kW. Kedua pendekatan neraca kalor menghasilkan hasil yang sama. Dalam Persamaan (3) perbedaannya adalah 11,6%, dan dalam Persamaan (4) kerja kompresor di sisi kondensor adalah 10,7%. Keduanya berada di atas ambang penerimaan 5%. Rekonsiliasi dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 4. Rekonsiliasi deviasi neraca kalor: hasil perhitungan ulang, angka laporan lapangan 2024, dan ketidakpastiannya

Formulasi	Persamaan	Hasil	Status terhadap ambang 5%
Selisih relatif Q_{cond} terhadap Q_{evap}	(3)	11,6%	Tidak memenuhi ambang
Neraca energi dengan kerja kompresor (kerangka AHRI 550/590)	(4)	10,7%	Tidak memenuhi ambang
Angka pada laporan evaluasi lapangan 2024	tidak terdokumentasi	2,24%	Tidak dapat direproduksi; dikutip sebagai pernyataan laporan

Catatan: pada $k = 1$ deviasi hasil Persamaan (3) berada pada rentang 1,0% sampai 22,2%. Rentang itu memuat nilai di bawah maupun di atas ambang 5%, sehingga neraca kalor pada dataset ini tidak dapat dinyatakan lolos maupun gagal secara meyakinkan, dan tidak dipakai sebagai bukti validitas data.

Alasan paling mungkin untuk ketidakseimbangan ini adalah nilai laju aliran kondensor yang merupakan satu nilai tanpa pencatatan frekuensi tinggi dan lebih rendah dari laju aliran evaporator sebesar $241,618 \text{ m}^3/\text{jam}$. Desain umum dari chiller berpendingin air akan menempatkan laju aliran kondensor di atas laju aliran evaporator karena kondensor menyampaikan panas dari evaporator dan kerja kompresor. Menambahkan 220 kW ke Q_{evap} menghasilkan 1.045,5 kW yang secara signifikan lebih tinggi dari Q_{cond} yang dihitung sebesar 933,9 kW dan perbedaan ini akan tertutup jika laju aliran kondensor aktual sekitar $224 \text{ m}^3/\text{jam}$ pada ΔT yang sama. Jadi nilai kondensor hanyalah angka indikatif. Neraca kalor dalam dataset ini tidak memberikan bukti validitas pengukuran seperti yang diimplikasikan pada tahun 2024. Validitas pengukuran hanya dapat diverifikasi di sisi evaporator dan harus dinilai berdasarkan tiga pengujian independen, yaitu rata-rata pengulangan jendela stabil, nilai yang sama seperti pada tahun 2024, dan diameter pipa dalam gambar selalu 240,0 mm. Hasil analisis kinerja dalam subbagian berikut didasarkan pada tiga pengujian ini, bukan neraca kalor. Penyebaran ketidakpastian dalam Persamaan (5) memberikan gambaran yang lebih baik daripada satu angka. Ketidakpastian relatif sebesar 9,7% dari panas evaporator, dan sebagian besar perbedaan berasal dari perbedaan suhu sebesar 3 °C, bukan dari flow meter. Panas evaporator dilaporkan sebesar $825,5 \pm 79,7 \text{ kW}$ dan COP aktual adalah $3,75 \pm 0,36$ pada $k = 1$ atau $\pm 0,73$ pada $k = 2$. Berikut adalah perbandingan penting: Perbedaan COP dari desain adalah 34,9%, jauh di atas rentang ketidakpastian sebesar 19,4% untuk $k = 2$, jadi perbedaan ini tidak dapat dijelaskan oleh kesalahan pengukuran biasa. Di sisi lain, ketidakseimbangan neraca kalor masih dalam rentang ketidakpastian sendiri. Kedua pernyataan menggunakan anggaran ketidakpastian yang sama dan menunjukkan bahwa kesimpulan tentang kinerja jauh lebih solid daripada tentang neraca kalor.

3.1.3 COP Aktual, Fraksi Beban, dan Maknanya

COP saat ini dari rasio 825,5 kW ke 220 kW adalah 3,75, sedangkan COP desain adalah 5,76 atau 0,44 kW/TR, menghasilkan perbedaan sebesar 34,9%. Angka ini tidak boleh dibaca sebagai

degradasi murni. Panas evaporator sebesar 825,5 kW hanya setara dengan 47,2% dari kapasitas terpasang sebesar 1.750 kW, yang berarti unit tersebut beroperasi pada beban parsial ketika data dicatat, sementara COP desain berlaku untuk kondisi penilaian beban penuh. Oleh karena itu, perbandingan langsung antara keduanya bersifat indikatif dan bukan pengukuran degradasi. Rasio daya sebenarnya memberikan informasi yang lebih tajam. Pada beban 47,2%, kompresor menyerap 220 kW atau 72,4% dari daya desain, sehingga daya spesifik aktual mencapai sekitar 0,94 kW/TR dibandingkan dengan 0,44 kW/TR pada dasar desain. Chiller sentrifugal yang sehat umumnya menyerap fraksi daya yang lebih rendah daripada fraksi bebannya dalam kondisi tanpa beban berat. Pola sebaliknya yang terlihat di sini konsisten dengan resistansi termal tambahan, pengangkatan kondensor yang lebih berat daripada dasar desain, atau keduanya, dan tidak dapat dijelaskan hanya dengan operasi beban parsial. Satu snapshot data tidak memungkinkan pemisahan kontributor-kontributor ini. (Mauro dkk., 2023; Ssembatya & Claridge, 2024).

Implikasi energinya lebih mudah dinilai dalam satuan konsumsi listrik daripada dalam satuan COP. Karena daya spesifik merupakan kebalikan COP, operasi pada COP 3,75 setara dengan energi listrik sekitar 53,6% lebih tinggi untuk beban pendinginan yang sama, sebagaimana dihitung memakai Persamaan (7).

$$\Delta E (\%) = [(1 / COP_{aktual}) / (1 / COP_{rancangan}) - 1] \times 100\% \quad (7)$$

Pada plant yang beroperasi panjang di iklim tropis, selisih sebesar itu berarti biaya listrik yang jauh melampaui perkiraan basis rancangan, sepanjang kondisi serupa bertahan pada operasi harian. Penyajian dalam satuan energi tidak menunjukkan penyebab, tetapi menerangkan mengapa penilaian pada tingkat penapisan dari satu dataset berdurasi pendek tetap berguna: penilaian itu menandai plant yang layak diselidiki lebih sistematis, jauh sebelum program pemantauan berbasis BAS dapat dibiayai.

3.1.4 TTD Evaporator sebagai Indikator Penapisan

Indikator yang lebih terarah, meski tetap tidak langsung, adalah TTD evaporator 1,3 °C pada laporan 2024. Nilai ini melampaui ambang sekitar 1,0 °C yang lazim dipakai teknisi lapangan sebagai penanda bahwa berkas pipa perlu diperiksa. Ambang itu berasal dari praktik pemeliharaan dan tidak tercantum sebagai kriteria dalam SNI 6390:2020 maupun ASHRAE 90.1-2016, sehingga kekuatannya sebagai bukti terbatas. Secara fisik, TTD menggambarkan penurunan temperatur melintasi dinding pipa beserta lapisan kerak, *biofilm*, atau endapan partikel pada permukaan sisi air. Pada pipa bersih yang bekerja mendekati *approach* rancangan, penurunan itu kecil, sedangkan TTD yang melebar menandakan perpindahan kalor yang kurang efisien dari air dingin ke refrigeran.

Asal ambang 1,0 °C perlu dinyatakan terbuka karena bobot buktinya bergantung pada hal itu. Nilai tersebut berasal dari praktik pemeliharaan lapangan dan tidak tercantum sebagai kriteria dalam SNI 6390:2020 maupun ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016; kedua standar mengatur efisiensi minimum peralatan, bukan batas *approach* (ASHRAE, 2016; Badan Standardisasi Nasional, 2020). Dasar teknis yang lebih kuat justru terletak pada arah dan besar perubahan *approach* terhadap basis bersih unit itu sendiri. Pengujian terkendali pada chiller sentrifugal 90 TR dalam ASHRAE Research Project RP-1043 menempatkan *approach* temperature sebagai salah satu parameter yang paling peka terhadap pengotoran penukar kalor, dengan kenaikan yang tumbuh seiring tingkat keparahan kegagalan (Beghi dkk., 2016), dan ASHRAE Handbook HVAC Systems and Equipment memperlakukan kenaikan *approach* sebagai penanda lazim tumbuhnya hambatan sisi air pada penukar kalor chiller (ASHRAE, 2020).

Yang tidak tersedia pada kasus ini justru basis pembandingnya. Tidak ada catatan *approach* saat komisioning maupun rekaman historis unit yang sama, sehingga TTD 1,3 °C hanya dapat dinilai terhadap ambang praktik dan tidak terhadap perilaku unit itu sendiri pada kondisi bersih. Status TTD dalam penelitian ini karena itu tetap sebagai pemicu pemeriksaan lanjutan dengan bobot bukti yang lemah, bukan sebagai kuantifikasi pengotoran.

Sebagai konteks, data kinerja pabrik bersertifikat AHRI untuk unit sebanding (Model HTS087M, R134a) yang dikutip dalam laporan 2024 menetapkan faktor pengotoran evaporator basis rancangan $0,0001 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$ pada rentang 12°F dan faktor pengotoran kondensor $0,00025 \text{ h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}/\text{Btu}$ pada rentang 10°F , keduanya pada kondisi pemeringkatan AHRI Standard 550/590 (AHRI, 2023). Konfigurasinya serupa dengan unit yang diaudit meski bukan unit yang sama. Angka-angka itu memperlihatkan betapa kecil margin yang dianggarkan pabrik untuk pengotoran sisi pipa pada kelas chiller ini. Dengan latar demikian, TTD $1,3^\circ\text{C}$ dapat dibaca sebagai indikasi awal bahwa hambatan perpindahan kalor sisi pipa tumbuh melewati perkiraan rancangan.

Penelitian ini tidak melakukan inspeksi pipa maupun uji pembersihan terkendali, dan tidak ada catatan inspeksi semacam itu dalam dokumentasi 2024. Peningkatan TTD karena itu dilaporkan sebagai indikasi pada tingkat penapisan, bukan sebagai pengotoran yang terkonfirmasi. Penjelasan lain tetap terbuka, termasuk laju alir air dingin yang lebih rendah daripada tuntutan beban sisi refrigeran, penempatan atau penyimpangan kalibrasi sensor temperatur, dan perubahan approach yang tidak berkaitan dengan endapan. (Aguilera dkk., 2023) memvalidasi pengotoran evaporator pada pompa kalor skala besar melalui pemantauan berbasis model yang dipadukan dengan prosedur *cleaning-in-place* terkendali sehingga perbandingan sebelum dan sesudah dapat dilakukan. Dataset 2024 dalam penelitian ini tidak memuat langkah semacam itu, dan bahasa yang dipakai sepanjang pembahasan sengaja dijaga tetap bersyarat.

3.1.5 Hasil Deteksi Anomali dan Atribusi SHAP

Persoalan kualitas data yang dicatat kualitatif pada Tabel 2 dinilai ulang secara sistematis memakai kerangka pada Tabel 5 meringkas hasilnya. Sebelum membaca angka-angka tersebut, satu hal harus diperjelas: jumlah anomali dalam setiap sesi setara dengan pembulatan dari $0,06 \times n$, yaitu 9 dari 138, 4 dari 65, dan 12 dari 186. Nilai persentase dari 6,2% hingga 6,5% adalah fungsi dari parameter kontaminasi dan bukan pengukuran tingkat gangguan dalam rekaman. Nilai informatifnya terletak pada posisi pembacaan yang ditandai dan fitur-fitur yang menjelaskannya.

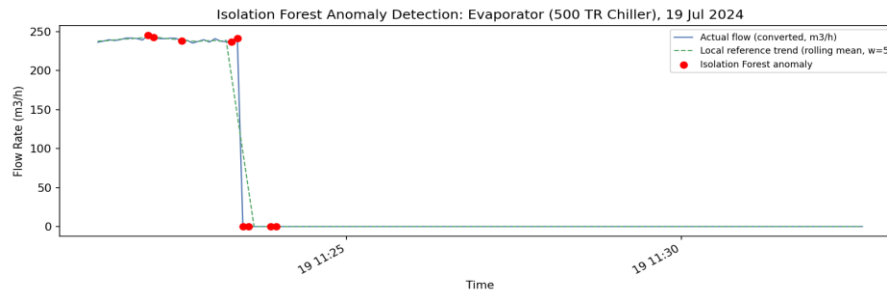
Tabel 5. Hasil deteksi anomali Isolation Forest per sesi (kontaminasi = 0,06; $n_{\text{estimators}} = 200$; seed tetap)

Sesi	n (titik)	n anomali	% ditandai	Kontaminasi	Fitur SHAP dominan
Evaporator (19 Jul, jendela stabil dan transisi)	138	9	6,5%	0,06	Residual terhadap rata-rata lokal
Kondensor Chiller 2 ke cooling tower (19 Jul)	65	4	6,2%	0,06	Residual terhadap rata-rata lokal
Kondensor ke cooling tower, sesi 2 (17 Sep)	186	12	6,5%	0,06	Δ laju alir (perubahan langkah)

Catatan: Jumlah anomali dalam setiap sesi sama dengan pembulatan dari $0,06 \times n$, jadi persentase yang ditandai adalah hasil dari parameter kontaminasi dan bukan ukuran tingkat gangguan dalam rekaman. Nilai n di sini adalah jumlah total pembacaan sesi yang dimasukkan ke dalam model, termasuk segmen di luar jendela stabil (jadi berbeda dari nilai n dalam Tabel 2, yang terbatas pada jendela stabil).

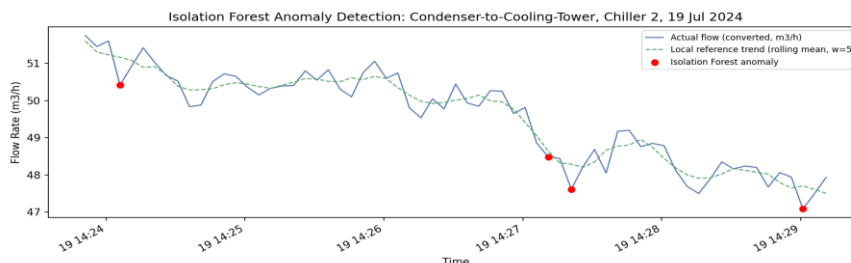
Dalam sesi evaporator (Gambar 1), lima dari sembilan titik yang ditandai berada dalam jendela m^3/jam yang stabil dengan beberapa lonjakan lokal (beberapa m^3/jam) sehubungan dengan titik lainnya. Empat titik yang tersisa melaporkan laju aliran nol dan pembacaan perubahan unit berikutnya dari 11:23:27 hingga 11:23:57. Segmen berikutnya, sekitar 8,5 menit ketika perangkat berputar melalui label g/h dan g/m dengan pembacaan yang secara fisik tidak masuk akal, hampir selalu terlewatkan. Ketika sinyal turun ke garis datar dengan variansi rendah yang panjang, segmen tersebut menjadi konsisten dengan sendirinya dan berhenti muncul di dalam kondisi aneh, tetapi tetap aneh sehubungan dengan kondisi operasi yang sebenarnya. Namun, ini tidak terjadi pada detektor anomali berbasis kepadatan dan titik isolasi: detektor berbasis kepadatan kuat untuk artefak

transien tetapi lemah untuk pergeseran rezim yang panjang. Jadi aturan penyaringan manual, yaitu, mengecualikan segmen dengan perubahan unit tanpa kejadian aliran fisik, masih diperlukan.



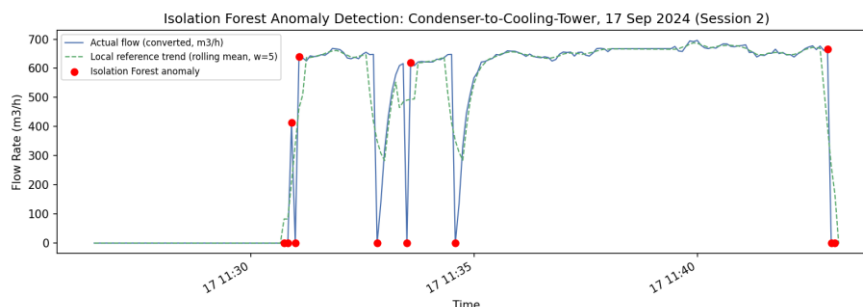
Gambar 1. Hasil deteksi anomali Isolation Forest pada rekaman laju alir evaporator 19 Juli 2024. Penanda merah menunjukkan pembacaan yang ditandai model, sedangkan garis putus-putus adalah rata-rata bergerak lima titik sebagai konteks visual.

Sesi kondensor dari Chiller 2 menuju menara pendingin (Gambar 2) menunjukkan empat titik pada pukul 14:24, 14:27 dengan dua titik dan 14:29, yang sesuai dengan penurunan lokal dalam tren menurun yang landai. Gambar tersebut diplot menggunakan interpretasi L/menit pada tampilan g/m, yang ditentukan melalui pemeriksaan luas penampang pipa. Diameter diasumsikan stabil 97,7 mm sepanjang sesi dan konsisten dengan pipa cabang kondensor, sementara interpretasi laju aliran massa literal memberikan diameter beberapa milimeter yang tidak mungkin diverifikasi. Koreksi mengubah skala laju aliran dari sekitar 0,05 m³/jam menjadi sekitar 47 hingga 52 m³/jam, dan rata-rata bersihnya adalah 841,92 L/menit atau sekitar 50,5 m³/jam dalam Tabel 1. Koreksi dilaporkan karena jelas menunjukkan bahwa normalisasi unit otomatis tidak boleh dipercaya tanpa pemeriksaan fisik independen, terutama ketika firmware instrumen diketahui salah memberi label pada tampilan.



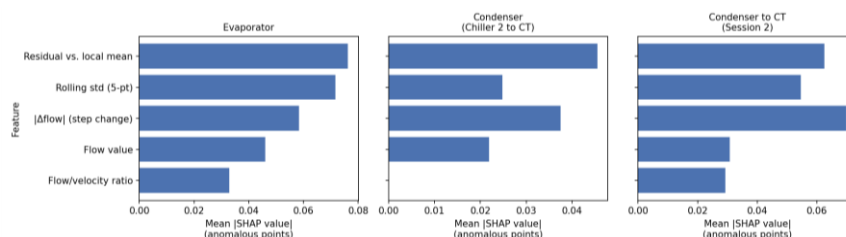
Gambar 2. Hasil deteksi anomali Isolation Forest pada rekaman laju alir kondensor Chiller 2 menuju cooling tower 19 Juli 2024, setelah koreksi satuan yang divalidasi lewat pemeriksaan luas penampang pipa dengan diameter terimplikasi median 97,7 mm.

Sesi kedua dari kondensor menuju menara pendingin (Gambar 3) menunjukkan 12 titik yang menandai peristiwa laju aliran nol dan pembacaan perubahan unit di sekitarnya. Titik-titik ini mengelompok setiap peristiwa nol yang terlihat dalam rekaman. Diameter yang diimplikasikan oleh segmen L/s adalah 450 mm, sesuai dengan header utama dari kondensor ke menara pendingin, dan stabil di bagian stabil dari rekaman. Kedua hal ini mendukung keputusan kami untuk tidak melakukan perhitungan kuantitatif pada sesi ini dan untuk mengkarakterisasi pola kualitas data.



Gambar 3. Hasil deteksi anomali Isolation Forest pada sesi kedua kondensor menuju cooling tower 17 September 2024, yang memperlihatkan kejadian laju alir nol berulang dan artefak pergantian satuan.

Gambar 4 merangkum atribusi SHAP berbasis permutasi kami yang dirata-rata pada titik-titik yang ditandai untuk ketiga sesi. Sisa terhadap tren rata-rata bergerak dan perubahan langkah absolut antara pembacaan adalah bobot terkuat, sementara rasio laju aliran terhadap kecepatan dan laju aliran sesaat sedikit dalam daftar. Pembobotan ini sejalan dengan diskusi kualitatif dalam Tabel 1: gangguan dalam rekaman disebabkan oleh perubahan tingkat titik, bukan perubahan bertahap dari tingkat laju aliran absolut. Penjelasan model tentang penandaannya sendiri dapat dikaitkan dengan perilaku instrumen yang diamati, meskipun ini adalah penjelasan teknis dan bukan penjelasan fisik.



Gambar 4. Rata-rata nilai mutlak SHAP permutasi pada titik yang ditandai sebagai anomali untuk setiap fitur rekayasa pada ketiga sesi.

Susunan bobot itu dapat diterangkan dari cara Isolation Forest bekerja, dan penjelasannya berguna karena menentukan kapan pola serupa boleh diharapkan muncul lagi. Model ini memberikan skor berdasarkan panjang jalur yang diperlukan untuk mengisolasi sebuah titik pada pohon yang dibuat dari pemotongan acak. Fitur dengan distribusi sempit dan unimodal seperti laju aliran sesaat dalam jendela stabil dengan deviasi standar hanya 2,3 m³/jam terhadap rata-rata 239,6 m³/jam hampir tidak pernah dapat memisahkan titik dalam beberapa pemotongan karena nilainya sangat rapat. Residual terhadap rata-rata lokal dan perbedaan absolut antara pembacaan memiliki bentuk distribusi yang berbeda: mayoritas pembacaan mendekati nol dan hanya beberapa yang melonjak. Titik-titik pada ekor distribusi yang diperpanjang seperti itu diisolasi hanya dalam satu atau dua pemotongan yang menghasilkan jalur pendek, skor anomali tinggi dan permutasi fitur tersebut mengubah skor jauh lebih signifikan daripada permutasi laju aliran sesaat.

Dua sifat dari rekaman mendukung hal ini. Pertama-tama, tingkat laju aliran absolut tidak stasioner. Sesi kondensor Chiller 2 menurun landai sepanjang sekitar enam menit, sehingga nilai sesaat yang tergolong tinggi pada akhir sesi bisa lebih rendah daripada nilai yang tergolong rendah pada awal sesi. Fitur berbasis rujukan lokal menghapus tren itu dan menyisakan simpangan sesaat, sedangkan laju alir sesaat justru mencampur keduanya. Kedua, rasio laju alir terhadap kecepatan hampir konstan di dalam satu rezim satuan, sebab keduanya berasal dari pengukuran transit-time yang sama pada pipa berpenampang tetap. Fitur itu berguna untuk membedakan rezim satuan, tetapi di dalam satu rezim ia nyaris tidak membawa informasi pembeda, sehingga bobot SHAP-nya kecil.

Konsekuensi interpretatif perlu dijaga agar tetap sempit. Bobot SHAP menjelaskan perilaku model, bukan penyebab fisik. Fitur residual mendominasi karena gangguan dalam catatan ini berbentuk transien tingkat titik. Jika gangguan dominan berbentuk pergeseran rezim yang lambat, pengaturan bobot akan berubah dan kekuatan deteksi kerangka kerja ini akan berkurang. Segmen flatline pascakejadian nol pada sesi evaporator adalah contoh langsung dari keadaan tersebut: gangguan itu nyata, tetapi tidak menghasilkan residual besar sehingga tidak tertangkap. Kesesuaian antara bobot fitur dan karakter gangguan yang teramati pada Tabel 2 karena itu dibaca sebagai penafsiran teknis yang konsisten, bukan sebagai pembuktian sebab fisik.

Ada tiga hal yang ditambahkan lapisan ini pada penapisan manual. Laju penandaan menjadi terdokumentasi dan dapat direproduksi dengan konfigurasi yang sama. Alasan penandaan menjadi terbaca pada tingkat fitur, yang merupakan prasyarat kepercayaan praktisi terhadap alat semacam ini (Srinivasan dkk., 2021). Selain itu, upaya memvalidasi masukan model memunculkan ketidakwajaran diameter pipa pada sesi kondensor Chiller 2 yang sebelumnya tidak terlihat. Sisi lemahnya juga jelas: segmen flatline evaporator lolos dari penandaan, sehingga kerangka anomali titik ini melengkapi dan tidak menggantikan aturan kualitas data manual. Model yang sadar urutan atau titik perubahan, misalnya pendekatan berbasis CNN dan autoencoder yang ditinjau (Bi dkk., 2024), berpeluang menutup celah itu.

3.6 Perbandingan terhadap SNI 6390:2020 dan ASHRAE 90.1-2016

COP rancangan 5,76 memenuhi kriteria efisiensi minimum bagi chiller sentrifugal berpendingin air menurut SNI 6390:2020 (Badan Standardisasi Nasional, 2020) dan ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016 (ASHRAE, 2016). COP aktual 3,75 berada jauh di bawah tingkat itu, tetapi perbandingannya perlu dibatasi dengan hati-hati. Kedua standar menetapkan efisiensi minimum pada kondisi pemeringkatan tertentu, sedangkan angka 3,75 berasal dari satu potret operasi pada beban 47,2% dan pada kondisi air kondensor yang tidak dikendalikan. Yang dapat disimpulkan adalah bahwa efisiensi operasi saat data direkam tidak mencerminkan tingkat kepatuhan pada tahap rancangan, bukan bahwa unit melanggar standar. Perbedaan antara kinerja *as-designed* dan *as-operated* berulang muncul dalam literatur FDD chiller (Gao dkk., 2023; Parsaei dkk., 2024; Ren dkk., 2023) dan berimplikasi pada cara penegakan kode energi bangunan. Kepatuhan biasanya diverifikasi pada tahap pemilihan peralatan dan komisioning berdasarkan COP terukur pabrikan, bukan berdasarkan kinerja saat unit beroperasi. Kasus ini memperlihatkan bahwa pendekatan demikian dapat memperkecil gambaran konsumsi energi nyata sepanjang umur layanan, sebab unit yang lolos pada tahap pengadaan tetap dapat bekerja jauh di bawah persyaratan tanpa terlihat oleh siapa pun selama penilaian lapangan tidak pernah dilakukan.

3.7 Kualitas Data Sensor dan Implikasi Metodologis

Sesi 19 Juli pada Tabel 2 tercatat pada Chiller 2, unit yang berbeda dari chiller 500 TR yang neraca kalor dan COP-nya dianalisis pada Tabel 3. Kedua kumpulan data karena itu tidak dapat digabungkan ke dalam satu perhitungan neraca kalor tanpa salah mengaitkan pembacaan pada peralatan yang keliru. Laju aliran unit kondensor yang diaudit hanya tersedia sebagai nilai tunggal sebesar 200 m³/jam tanpa pencatatan frekuensi tinggi dan oleh karena itu tidak dapat diperiksa silang seperti yang dilakukan di sisi evaporator. Perbedaan ini berguna sebagai pengamatan metodologis: kelengkapan data dapat bervariasi dari satu kampanye ke kampanye berikutnya, tetapi dalam setiap kasus seseorang perlu menyimpan catatan frekuensi tinggi untuk setiap titik masuk laju aliran ke dalam keseimbangan panas akhir. Rekaman mentah juga menunjukkan gangguan pada tingkat transduser. Dalam sesi evaporator, laju aliran turun menjadi nol dan perangkat secara otomatis beralih satuan dari m³/jam ke g/jam kemudian g/m dan pembacaan tidak pernah pulih: sekitar 8,5 menit atau 105 dari 138 pembacaan berada pada nilai g/m yang rendah. Sesi kondensor bulan September juga menunjukkan gangguan dengan banyak kejadian nol untuk g/menit dan L/detik, dan sesi ini kemudian dikeluarkan dari analisis kuantitatif. Gejala-gejala ini konsisten dengan pelemahan sinyal ultrasonik sementara, udara yang dibawa oleh aliran, atau pergeseran posisi transduser, bukan transien hidraulik yang sebenarnya di dalam pipa. Hasil Isolation Forest

menunjukkan bahwa sebagian besar gangguan ini dapat secara otomatis ditandai setelah rekaman dinormalisasi, tetapi tidak semuanya.

Bagi praktisi yang menilai kinerja pendingin tanpa BAS, temuan di atas memiliki empat implikasi. Interval perekaman perlu cukup pendek, 5 detik atau kurang seperti pada dataset ini, agar jendela stabil dapat diidentifikasi setelah pengukuran selesai. Konsistensi satuan harus diverifikasi pada setiap pembacaan dan tidak diandaikan tetap sepanjang sesi, sebaiknya lewat pemeriksaan fisik yang berdiri sendiri seperti perbandingan luas penampang pipa. Lapisan deteksi anomali tanpa penyeliaan berguna untuk menandai dan menerangkan artefak tingkat titik, tetapi perlu divalidasi terhadap aturan manual, terutama untuk pergeseran rezim berkepanjangan. Terakhir, setidaknya satu sesi pengukuran ulang per lokasi perlu disediakan untuk menilai keberulangan, sebagaimana tersedia pada lokasi evaporator tetapi tidak pada lokasi kondensor unit yang diaudit. Terakhir, identitas dan status kalibrasi instrumen perlu dicatat bersama data, sebab tanpa keduanya anggaran ketidakpastian hanya dapat disusun dari asumsi kelas alat dan rentang hasil menjadi lebih lebar daripada yang sebenarnya perlu.

3.8 Sintesis

Rangkaian hasil di atas membentuk gambaran yang koheren sekaligus terbatas. Rekaman evaporator lolos tiga uji yang saling bebas, yaitu keberulangan rata-rata jendela stabil, kesesuaian dengan nilai yang dipakai laporan 2024, dan diameter pipa terimplikasi yang konstan, sehingga data sisi evaporator layak dipakai untuk perhitungan kinerja. Neraca kalor tidak masuk ke dalam daftar itu: hasil perhitungan ulang menyimpang 11,6% dan tidak memenuhi ambang 5%, sedangkan angka 2,24% pada laporan 2024 tidak dapat direproduksi. Di atas dasar yang lebih sempit itu, chiller bekerja pada daya spesifik sekitar 0,94 kW/TR terhadap 0,44 kW/TR pada basis rancangan, dengan fraksi daya yang melampaui fraksi bebannya, dan dengan TTD di atas ambang praktik yang biasa dipakai. Selisih kinerja tersebut bertahan terhadap ketidakpastian pengukuran pada $k = 2$, sedangkan ketidakseimbangan neraca kalor tidak. Pengotoran evaporator merupakan penjelasan yang masuk akal untuk sebagian pola itu, tetapi bukan satu-satunya kandidat, dan dataset satu potret tidak dirancang untuk memisahkannya. Lapisan Isolation Forest tidak mengubah kesimpulan kinerja, melainkan memperkuat keyakinan terhadap masukan perhitungan dan memunculkan satu kesalahan skala satuan yang sebelumnya tersembunyi.

3.9 Keterbatasan Penelitian

Delapan keterbatasan perlu dinyatakan agar kekuatan kesimpulan tidak dilebihkan. Pertama, penelitian bersandar pada satu unit chiller ($N = 1$) dan satu potret operasi, sehingga hasilnya tidak dapat digeneralisasi. Kedua, penelitian ini tidak melakukan pengukuran baru; seluruh angka berasal dari dataset 2024, dan angka deviasi neraca kalor 2,24% pada laporan lapangan tidak dapat direproduksi sehingga tidak dipakai sebagai hasil verifikasi. Ketiga, tidak ada inspeksi fisik berkas pipa maupun uji pembersihan terkendali, sehingga pengotoran tetap berstatus dugaan. Keempat, data direkam pada beban parsial 47,2% tanpa verifikasi multibeban, sehingga perbandingan terhadap COP rancangan beban penuh bersifat indikatif. Kelima, laju alir kondensor unit yang diaudit tidak memiliki rekaman berfrekuensi tinggi dan nilainya lebih rendah daripada laju alir evaporator, sehingga kalor kondensor diperlakukan sebagai angka indikatif dan neraca kalor tidak dipakai sebagai bukti validitas data. Keenam, dataset tidak memiliki label anomali, sehingga akurasi model tidak dapat diukur dan parameter kontaminasi tidak dapat disetel; sensitivitas hasil terhadap nilai kontaminasi belum diuji. Ketujuh, identitas, tipe, dan status kalibrasi instrumen tidak terdokumentasi, sehingga anggaran ketidakpastian pada Tabel 1 bertumpu pada asumsi kelas alat dan bukan pada sertifikat kalibrasi; angka $\pm 9,7\%$ pada kalor evaporator karena itu merupakan perkiraan konservatif, bukan ketidakpastian terkalibrasi. Kedelapan, ambang TTD 1,0 °C berasal dari praktik pemeliharaan dan bukan kriteria standar, dan tidak tersedia nilai approach saat komisioning sebagai basis pembandingan unit yang sama, sehingga bobotnya sebagai bukti terbatas.

3.2 Pembahasan

Analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa validasi fisik dataset dan neraca kalor dari chiller sentrifugal berpendingin air 500 TR memberikan pemahaman yang jelas mengenai kinerja unit tersebut. Tabel 2 mengungkapkan rekaman laju alir ultrasonik yang menunjukkan konsistensi dalam pengukuran, dengan rata-rata laju alir evaporator sebesar $239,57 \pm 2,33 \text{ m}^3/\text{jam}$, yang hanya berselisih kurang dari 1% dengan laju alir yang digunakan dalam perhitungan neraca kalor. Hal ini menunjukkan bahwa data yang diambil selama pengukuran dapat diandalkan. Temuan ini sejalan dengan analisis Aguilera et al. (2023) yang menekankan perlunya pemantauan sistem untuk mendeteksi potensi masalah. Namun, deviasi neraca kalor yang mencapai 11,6% melebihi ambang penerimaan 5%, menciptakan pertanyaan tentang ketepatan pengukuran. Hal ini mungkin disebabkan oleh laju alir kondensor yang tidak terukur dengan frekuensi tinggi, yang lebih rendah dari laju alir evaporator. Ketidakpastian ini mengindikasikan bahwa meskipun data dari sisi evaporator dapat dipercaya, hasil neraca kalor tidak dapat dijadikan sebagai bukti validitas pengukuran. Penelitian sebelumnya oleh Beghi et al. (2016) juga menunjukkan pentingnya validasi data yang diambil dari sistem pendingin untuk memastikan akurasi.

Koefisien kinerja (COP) aktual yang tercatat sebesar $3,75 \pm 0,36$ menunjukkan penurunan signifikan dibandingkan dengan COP rancangan 5,76. Ini menunjukkan bahwa chiller beroperasi pada beban parsial sebesar 47,2%, yang menjelaskan perbedaan kinerja yang besar. Daya spesifik yang tercatat sebesar $0,94 \text{ kW/TR}$ menunjukkan bahwa unit ini beroperasi dengan efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan desain. Hal ini dapat diindikasikan oleh adanya resistansi termal tambahan, sebagaimana dijelaskan oleh Han et al. (2025). TTD evaporator yang tercatat sebesar $1,3^\circ\text{C}$ melebihi ambang batas umum, menandakan perlunya pemeriksaan lebih lanjut terhadap kondisi pipa. Namun, nilai ini tidak dapat dijadikan bukti definitif tanpa data historis untuk perbandingan. Deteksi anomali menggunakan model Isolation Forest menunjukkan bahwa sebagian besar gangguan dapat ditandai secara otomatis, tetapi segmen flatline pascakejadian nol tidak terdeteksi. Meskipun metode ini efektif dalam menandai anomali, masih ada kebutuhan untuk penyaringan manual untuk menangkap pola yang lebih kompleks. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Bi et al. (2024) yang menunjukkan bahwa metode deteksi berbasis pohon dapat meningkatkan sensitivitas deteksi kegagalan sensor.

4. Kesimpulan dan Saran

Analisis retrospektif atas dataset pengukuran lapangan 2024 menjawab keempat tujuan penelitian tanpa pengambilan data baru. Validasi konsistensi fisik berhasil: diameter pipa terimplikasi yang dipulihkan dari hubungan laju alir dan kecepatan bernilai stabil pada ketiga lokasi dan sekaligus mengoreksi satu kesalahan skala satuan pada sesi kondensor Chiller 2. Perhitungan ulang memberi kalor evaporator $825,5 \pm 79,7 \text{ kW}$ dan COP aktual $3,75 \pm 0,36$ pada beban 47,2% kapasitas terpasang. Selisih terhadap COP rancangan tidak dibaca sebagai degradasi murni, sebab basis pemeringatannya berbeda; indikator yang lebih kuat adalah daya spesifik $0,94 \text{ kW/TR}$ dan fraksi daya yang melampaui fraksi bebannya, dan selisih itu bertahan terhadap ketidakpastian pengukuran pada $k = 2$. Neraca kalor hasil perhitungan ulang menyimpang 11,6% dan tidak memenuhi ambang 5%, sedangkan angka 2,24% pada laporan lapangan tidak dapat direproduksi. Kesimpulan kinerja karena itu bersandar pada sisi evaporator yang tervalidasi, bukan pada neraca kalor, dan TTD $1,3^\circ\text{C}$ tetap berstatus pemicu pemeriksaan lanjutan.

Pada sisi metodologis, Isolation Forest dengan atribusi SHAP bekerja sebagai lapisan penapisan yang dapat diperiksa ulang, bukan sebagai pengklasifikasi kegagalan. Proporsi pembacaan yang ditandai mengikuti parameter kontaminasi sehingga tidak dilaporkan sebagai temuan; yang bermakna adalah lokasi penandaan pada kejadian laju alir nol dan transisi satuan, serta dominasi fitur residual dan perubahan langkah yang dapat diterangkan dari mekanisme isolasi model. Keterbatasannya bersifat struktural: detektor anomali titik melewati pergeseran rezim berkepanjangan seperti flatline pascakejadian nol, yang justru tertangkap aturan penapisan manual.

Kontribusi penelitian ini terletak pada prosedur validasi fisik berbiaya rendah untuk memutuskan pelabelan satuan yang ambigu, dokumentasi terbuka atas persoalan kualitas data dan ketidakpastian yang biasanya tidak dilaporkan, serta penilaian kinerja retrospektif yang menempatkan fraksi beban sebagai syarat pembandingan. Penelitian lanjutan sebaiknya menambahkan kampanye berdurasi lebih panjang dengan instrumen terkalibrasi, rekaman berpasangan pada setiap titik laju alir, inspeksi fisik berkas pipa, pengujian multibeban, uji sensitivitas terhadap parameter kontaminasi, serta model anomali yang sadar urutan atau titik perubahan.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian serta penyusunan artikel ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada rekan sejawat yang telah memberikan masukan dan saran selama proses penyusunan dan penyempurnaan naskah.

6. Daftar Pustaka

- Aguilera, J. J., Meesenburg, W., Markussen, W. B., Poulsen, J. L., Zühlsdorf, B., & Elmegaard, B. (2023). Adaptive model-based monitoring of large-scale heat pump prone to evaporator fouling. *0565*. <https://doi.org/10.18462/IIR.ICR.2023.0565>
- AHRI. (2023). *AHRI Standard 550/590 (I-P): Performance rating of water-chilling and heat pump water-heating packages using the vapor compression cycle*. Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute. <https://www.thenbs.com/publicationindex/documents/details?Pub=AHRI&DocId=342937>
- Almobarek, M. (2024). Most frequent chiller's faults: An empirical predictive maintenance study. *IEOM Society International, USA*. <https://doi.org/10.46254/NA09.20240193>
- ASHRAE. (2016). *ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2016: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. www.ashrae.org
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 6390:2020 Konservasi energi sistem tata udara pada bangunan gedung (ICS 91.040.01)*. Badan Standardisasi Nasional. <https://akses-sni.bsn.go.id/dokumen/2020/SNI%206390-2020/#p=1>
- Beghi, A., Cecchinato, L., Peterle, F., Rampazzo, M., & Simmini, F. (2016). Model-based fault detection and diagnosis for centrifugal chillers. In *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems, SysTol* (pp. 158–163). <https://doi.org/10.1109/SYSTOL.2016.7739744>
- Bi, J., Wang, H., Yan, E., Wang, C., Yan, K., Jiang, L., & Yang, B. (2024). AI in HVAC fault detection and diagnosis: A systematic review. *Energy Reviews*, *3*(2), 100071. <https://doi.org/10.1016/J.ENREV.2024.100071>
- Chen, Z., Xiao, F., Guo, F., & Yan, J. (2023). Interpretable machine learning for building energy management: A state-of-the-art review. *Advances in Applied Energy*, *9*, 100123. <https://doi.org/10.1016/J.ADAPEN.2023.100123>

- Emerson Electric Co. (2024). *Flexim™ FLUXUS G631 EE: Portable clamp-on ultrasonic flow and energy meter for gases and liquids* [Product documentation]. Emerson. <https://www.emerson.com/en/measurement-instrumentation/products/flexim-fluxus-g631-ee-portable-clamp-on-ultrasonic-flow-and-energy-meter>
- Gao, Y., Miyata, S., & Akashi, Y. (2023). Automated fault detection and diagnosis of chiller water plants based on convolutional neural network and knowledge distillation. *Building and Environment*, 245, 110885. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2023.110885>
- Guo, Y., Tian, Z., Wang, H., Chen, M., Chu, P., & Sheng, Y. (2025). Adaptive lift chiller units fault diagnosis model based on machine learning. *PLOS ONE*, 20(4), e0320563. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0320563>
- Han, H., Ren, Z., Cui, X., & Gu, B. (2025). Variable-condition fault diagnosis for building chiller based on deep feature extraction and discrepancy minimization. *Energy*, 330, 136832. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2025.136832>
- Kaushik, K., & Naik, V. (2024). Detecting faults in the cooling systems by monitoring temperature and energy. *Energy Informatics*, 7(1), 46. <https://doi.org/10.1186/S42162-024-00351-1>
- Keyence Corporation. (2024). *The smart guide to flow meters for building automation systems*. Keyence. <https://www.keyence.com/blog/the-smart-guide-to-flow-meters-for-building-automation-systems.jsp>
- Liang, A., Hu, Y., & Li, G. (2023). The impact of improved PCA method based on anomaly detection on chiller sensor fault detection. *International Journal of Refrigeration*, 155, 184–194. <https://doi.org/10.1016/J.IJREFRIG.2023.09.002>
- Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z. H. (2008). Isolation forest. In *Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining, ICDM* (pp. 413–422). <https://doi.org/10.1109/ICDM.2008.17>
- Lu, C., Ma, X., & Yan, K. (2024). Chiller fault diagnosis based on improved variational autoencoder and co-training framework: A case study of insufficient samples. *Journal of Building Engineering*, 88, 109137. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.109137>
- Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017-December, 4766–4775. <https://arxiv.org/pdf/1705.07874>
- Marbun, R., Ardiansyah, T., & Nofirman, N. (2025). Performance evaluation and optimization of chiller systems: A data-driven approach to enhancing energy efficiency. *SINTEK JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 19(1), 11–24. <https://doi.org/10.24853/SINTEK.19.1.11-24>
- Mauro, A. W., Pelella, F., & Viscito, L. (2023). Performance degradation of air source heat pumps under faulty conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 103010. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2023.103010>
- Meas, M., Machlev, R., Kose, A., Tepljakov, A., Loo, L., Levron, Y., Petlenkov, E., & Belikov, J. (2022). Explainability and transparency of classifiers for air-handling unit faults using explainable artificial intelligence (XAI). *Sensors*, 22(17), 6338. <https://doi.org/10.3390/S22176338>

- Parsaei, A., Gunay, B., O'Brien, W., & Moromisato, R. (2024). Unsupervised identification of zone-level anomalies in VAV terminal units utilizing autoencoders and PCA. *Science and Technology for the Built Environment*, 30(10), 1196–1216. <https://doi.org/10.1080/23744731.2024.2411161>
- Ren, Z., Han, H., Cui, X., Lu, H., & Luo, M. (2023). Novel data-pulling-based strategy for chiller fault diagnosis in data-scarce scenarios. *Energy*, 279, 128019. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.128019>
- Sharma, V., & Unune, D. (2024). Enhancing reliability and efficiency: An ASHRAE Level 2 energy audit of a regional hospital. <https://doi.org/10.20944/preprints202407.1664.v1>
- Srinivasan, S., Arjunan, P., Jin, B., Sangiovanni-Vincentelli, A. L., Sultan, Z., & Poolla, K. (2021). Explainable AI for chiller fault-detection systems: Gaining human trust. *Computer*, 54(10), 60–68. <https://doi.org/10.1109/MC.2021.3071551>
- Ssembatya, M., & Claridge, D. E. (2024). Quantitative fault detection and diagnosis methods for vapour compression chillers: Exploring the potential for field-implementation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114418. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2024.114418>
- Wang, Z., Guo, J., Xia, P., Wang, L., Zhang, C., Leng, Q., & Zheng, K. (2024). Feature selection for chillers fault diagnosis from the perspectives of machine learning and field application. *Energy and Buildings*, 307, 113937. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2024.113937>
- Wang, Z., Xia, P., Guo, J., Zhou, S., Wang, L., Wang, Y., & Zhang, C. (2025). Efficient feature selection for enhanced chiller fault diagnosis: A multi-source ranking information-driven ensemble approach. *Building Simulation*, 18(1), 141–159. <https://doi.org/10.1007/S12273-024-1199-1/METRICS>
- Yan, K. (2021). Chiller fault detection and diagnosis with anomaly detective generative adversarial network. *Building and Environment*, 201, 107982. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107982>
- Yan, K., & Zhou, X. (2022). Chiller faults detection and diagnosis with sensor network and adaptive 1D CNN. *Digital Communications and Networks*, 8(4), 531–539. <https://doi.org/10.1016/J.DCAN.2022.03.023>