

Anotasi Peristiwa Berbasis Aturan dan Pemrofilan Pencilan Robust Temporal pada Pompa MOL Industri

Aryantono Martowidjojo

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia,

Jl. Mayjen Sutoyo no.2, Indonesia 13630

aryantono@uki.ac.id

Abstrak. Catatan pompa industri sering disimpan sebagai lembar kerja operator alih-alih sebagai data pemantauan kondisi yang siap dianalisis. Studi ini mengembangkan alur kerja tiga tahap untuk catatan pompa MOL multitalahun: transformasi data, ekstraksi peristiwa heuristik, dan pemrofilan deviasi temporal. Data terdiri atas 3,414 baris operasional hasil transformasi sebelumnya dari 2024 hingga Mei 2026; 3,408 baris memiliki penanda waktu yang dapat diuraikan untuk reanalisis statistik ini. Penanda peristiwa heuristik diturunkan dari medan status dan catatan operator, sementara skor-z robust termodifikasi berjendela mengembang dihitung hanya dengan observasi terdahulu dari unit yang sedang beroperasi yang sama. Profil vibrasi, termal, serta proses/beban dilaporkan secara terpisah. Median vibrasi harian berbeda antartahun (Kruskal-Wallis $H=202.93$, $p<0.001$), dengan median 2.3, 2.4, dan 3.5 mm/s untuk 2024, 2025, dan 2026. Analisis terstratifikasi per unit menunjukkan bahwa peningkatan tersebut tidak sepenuhnya dijelaskan oleh perubahan unit dominan yang beroperasi, walaupun cakupan antarunit tidak merata. Tidak ada observasi yang melampaui batas alarm vibrasi 7.1 mm/s. Proporsi penandaan sangat sensitif terhadap ambang z-robust, yang menegaskan bahwa metode ini harus ditafsirkan sebagai pemrofilan pencilan temporal, bukan deteksi kegagalan. Alur kerja ini berpotensi mendukung audit data, telaah tren, dan pemilihan catatan untuk pemeriksaan keteknikan, tetapi tidak dapat membedakan degradasi peralatan dari perubahan beban, efek instrumentasi, atau artefak pencatatan tanpa konteks operasional tambahan.

Kata kunci: pompa industri; log operator; anotasi peristiwa berbasis aturan; pemrofilan pencilan temporal; skor-z robust; analisis nonparametrik; data pemeliharaan

Abstract. Industrial pump records are often stored as operator spreadsheets rather than analysis-ready condition-monitoring data. This study develops a three-stage pipeline for multi-year MOL pump records: data transformation, heuristic event extraction, and temporal deviation profiling. The data comprise 3,414 previously transformed operational rows from 2024 to May 2026; 3,408 rows had resolvable timestamps for the present statistical reanalysis. Heuristic event flags are derived from status fields and operator remarks, while expanding-window modified robust z-scores are calculated using only earlier observations from the same running unit. Vibration, thermal, and process/load profiles are reported separately. Daily median vibration differed across years (Kruskal-Wallis $H=202.93$, $p<0.001$), with medians of 2.3, 2.4, and 3.5 mm/s for 2024, 2025, and 2026. Unit-stratified analysis indicates that the increase is not explained solely by a change in the dominant running unit, although coverage is uneven across units. No observation exceeded the 7.1 mm/s vibration alarm limit. Flag proportions were highly sensitive to the robust-z threshold, confirming that the method should be interpreted as temporal outlier profiling rather than failure detection. The pipeline potentially supports data auditing, trend review, and selection of records for engineering examination, but it cannot distinguish equipment degradation from load changes, instrumentation effects, or recording artefacts without additional operational context.

Keywords: industrial pumps; operator logs; rule-based event annotation; temporal outlier profiling; robust z-score; non-parametric analysis; maintenance data

1. Pendahuluan

Pompa industri merupakan aset berputar yang kritis di pabrik proses. Penginderaan berkelanjutan dan diagnostik otomatis semakin umum (Carvalho et al., 2019; Susto et al., 2015; Zonta et al., 2020), tetapi banyak fasilitas masih bergantung pada catatan shift berbasis lembar kerja yang memuat vibrasi, tekanan, laju aliran, temperatur, arus, status unit, dan catatan singkat operator. Catatan tersebut bernilai secara operasional namun sulit dianalisis karena skemanya berubah, tanggal

diteruskan melalui sel kosong, catatan bersifat informal, medan status berulang di antara shift, dan nilai abnormal dapat mencerminkan perilaku peralatan maupun artefak pencatatan.

Versi ini mengadopsi perumusan yang sempit dan transparan. Pekerjaan disusun sebagai alur kerja tiga tahap: transformasi lembar kerja lama, ekstraksi heuristik atas kandidat peristiwa operasional, dan pemprofilan deviasi temporal yang bebas look-ahead. Metode numeriknya adalah skor-z robust termodifikasi berjendela mengembang, bukan model kesehatan kontekstual, model baseline multivariat, atau pendeteksi kegagalan.

Studi ini juga merevisi analisis statistik. Perbedaan antartahun dievaluasi dengan uji nonparametrik yang diterapkan pada median harian, ringkasan terstratifikasi per unit digunakan untuk menelaah perubahan bauran operasi, ambang z-robust divariasikan dari 2.5 hingga 5.0, dan interval kepercayaan bootstrap blok-hari dilaporkan untuk median serta proporsi penandaan. Tambahan ini mengkuantifikasi ketidakpastian sekaligus mempertahankan sifat eksploratif studi.

1.1 Pertanyaan penelitian

1. Bagaimana lembar kerja operator multitahun yang heterogen dapat ditransformasikan menjadi kumpulan data operasi pompa yang konsisten dan dapat diaudit?
2. Kandidat peristiwa operasional dan yang terkait pemeliharaan apa saja yang dapat diekstraksi melalui aturan transparan yang diterapkan pada medan status dan catatan operator?
3. Bagaimana pengukuran vibrasi berbeda antartahun dan antarunit yang beroperasi setelah perubahan unit dominan diperhitungkan secara deskriptif?
4. Seberapa sensitif penanda pencilan robust yang kausal secara temporal terhadap ambang z-termodifikasi yang dipilih?

1.2 Kontribusi dan lingkup

- Alur kerja tiga tahap yang dapat direproduksi untuk transformasi data, ekstraksi peristiwa heuristik, dan pemprofilan deviasi temporal.
- Implementasi z-robust berjendela mengembang yang bebas look-ahead dan hanya menggunakan catatan terdahulu dari unit yang beroperasi sama.
- Profil vibrasi, termal, serta proses/beban yang terpisah, bukan satu skor kesehatan peralatan tunggal.
- Perbandingan antartahun secara nonparametrik, stratifikasi per unit, analisis sensitivitas ambang, dan interval kepercayaan bootstrap blok-hari.
- Penafsiran yang sengaja dibatasi: alur kerja ini berpotensi mendukung audit data dan telaah keteknikan, tetapi tidak menetapkan degradasi, kausalitas, atau kinerja pemeliharaan prediktif.

2. Latar belakang konseptual

2.1 Pemantauan kondisi dan catatan operator

Pemeliharaan berbasis kondisi umumnya bergantung pada pengukuran yang dapat dikaitkan dengan kondisi peralatan dan konteks operasi (Jardine et al., 2006; Lei et al., 2018). Vibrasi banyak digunakan untuk peralatan berputar (ISO, 2009), sementara tekanan, laju aliran, arus, dan temperatur dapat memberikan informasi pelengkap. Namun, variabel-variabel tersebut dipengaruhi oleh titik operasi, beban, lokasi pengukuran, kondisi lingkungan, dan instrumentasi. Karena itu, deviasi pada variabel proses atau temperatur tidak otomatis menjadi bukti kemunduran mekanis.

Catatan operator dan medan status merupakan sumber bukti yang berbeda. Keduanya dapat mendokumentasikan aktivitas perbaikan, ketidaktersediaan, masalah relai, kebocoran, pengujian,

dan pergantian unit, tetapi entri teks bebas yang singkat memuat singkatan, campuran bahasa, catatan berulang, dan pilihan kata yang subjektif. Dalam makalah ini, aturan digunakan untuk membentuk penanda peristiwa heuristik dan episode kandidat peristiwa. Istilah anotasi dan kandidat peristiwa digunakan alih-alih pelabelan peristiwa lemah atau label lemah.

2.2 Pemrofilan pencilan temporal

Skor-z robust termodifikasi membandingkan suatu observasi dengan median rujukan dan deviasi absolut median (Iglewicz & Hoaglin, 1993). Pendekatan ini mudah ditafsirkan dan kurang sensitif terhadap nilai ekstrem dibandingkan penskalaan rerata-simpangan baku (Rousseeuw & Croux, 1993). Pendekatan ini tetap merupakan aturan univariat, yaitu salah satu kelas paling sederhana dalam taksonomi deteksi pencilan (Chandola et al., 2009; Hodge & Austin, 2004), bahkan ketika skor maksimum di antara beberapa variabel dilaporkan. Pendekatan ini tidak mengidentifikasi rezim operasi, memodelkan korelasi, atau mengestimasi residu dari kurva pompa.

Kausalitas temporal dipertahankan dengan menyusun setiap distribusi rujukan dari observasi yang tercatat sebelum observasi target. Hal ini menghilangkan kebocoran look-ahead langsung. Hal ini tidak menciptakan evaluasi prediktif di luar sampel; prosedurnya merupakan rekonstruksi retrospektif atas bagaimana suatu penanda waktu-nyata dapat dihasilkan.

2.3 Penafsiran statistik

Catatan shift merupakan observasi runtun waktu berulang, bukan sampel acak yang independen. Untuk mengurangi pseudoreplikasi, perbandingan inferensial menggunakan median vibrasi harian alih-alih setiap baris shift. Uji Kruskal-Wallis dan Mann-Whitney mengkuantifikasi perbedaan distribusi tanpa mengasumsikan normalitas (Kruskal & Wallis, 1952; Mann & Whitney, 1947; Hollander et al., 2014). Nilai-p keduanya diperlakukan sebagai eksploratif karena ketergantungan serial residual dan perubahan praktik pengukuran mungkin masih ada. Interval bootstrap blok-hari meresampel keseluruhan hari (Efron & Tibshirani, 1993) sehingga lebih efektif mempertahankan ketergantungan dalam hari yang sama daripada resampling per baris.

3. Konteks industri dan data

3.1 Sistem pompa MOL

Berkas sumber menjelaskan unit FP-P1A, FP-P1B, FP-P1C, dan FP-P1D. Satu unit biasanya ditandai Running sementara unit lainnya ditandai Standby, Breakdown, N/A, atau dibiarkan kosong. FP-P1D memerlukan penafsiran hati-hati: unit ini ditandai N/A pada 2,744 baris, kosong pada 497 baris, Running pada 119 baris, Standby pada 47 baris, dan Breakdown pada satu baris. Karena itu, catatan yang ada tidak dapat menetapkan apakah FP-P1D secara konsisten menjadi bagian dari konfigurasi duty/standby yang sama sepanjang periode studi.

3.2 Sumber data dan populasi reanalisis

Tiga sumber lembar kerja mencakup Januari-Desember 2024, Januari-Desember 2025, dan Januari-Mei 2026. Arsip hasil transformasi sebelumnya memuat 3,414 baris operasional unik. Reanalisis statistik ini mempertahankan 3,408 baris dengan informasi tanggal-waktu yang dapat diuraikan: 1,477 dari 2024, 1,402 dari 2025, dan 529 dari 2026. Dari jumlah tersebut, 3,386 baris memuat sedikitnya satu pengukuran numerik terpilih. Selisih antara arsip hasil transformasi dan populasi analisis dilaporkan secara eksplisit alih-alih membuang baris secara diam-diam.

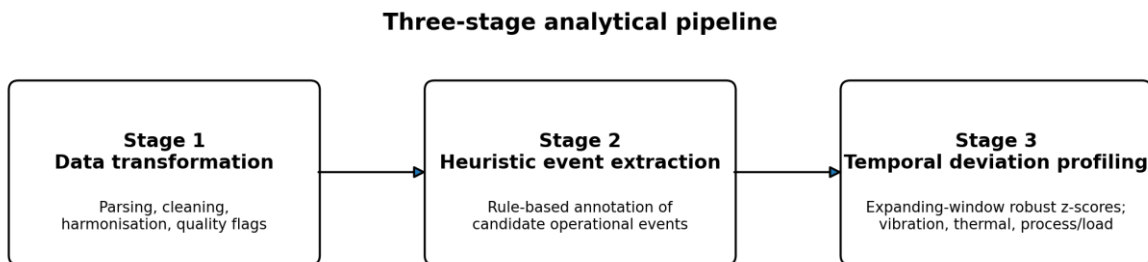
Tahun	Baris dengan waktu teruraikan	Baris dengan vibrasi keseluruhan	Jumlah hari terwakili	Unit dominan yang beroperasi
2024	1,477	1,466	365	FP-P1C (1,114 baris)
2025	1,402	1,394	344	FP-P1C (1,256 baris)
2026 (Jan-Mei)	529	525	132	FP-P1B (323 baris)

Tabel 1. Populasi reanalisis dan bauran operasi.

3.3 Skema dan tantangan kualitas data

- Nilai tanggal muncul sekali per hari dan harus diteruskan ke baris-baris shift.
- Skema 2026 menambahkan vibrasi penyangga, daya, temperatur seal mekanis, serta temperatur badan-motor.
- Catatan operator berulang di antara shift sehingga tidak dapat ditafsirkan sebagai peristiwa independen.
- Tiga nilai laju aliran di atas 100,000 tidak konsisten dengan rentang lazim dan diperlakukan sebagai penanda proses/kualitas data.
- Pengukuran yang hilang mungkin bersifat sistematis alih-alih acak; sel kosong dapat mencerminkan kondisi sensor, operasi, atau pencatatan.
- Perubahan unit dominan yang beroperasi dan skema pengukuran dapat memengaruhi perbandingan pada tingkat tahun.

4. Metodologi



Gambar 1. Alur kerja analitis tiga tahap.

4.1 Tahap 1: Transformasi data

Tahap transformasi mengurai lembar dalam buku kerja, merekonstruksi tanggal, mengonversi medan numerik, menyeragamkan skema 2024-2025 dan 2026, menstandarisasi nilai status unit, mengidentifikasi unit yang beroperasi, serta menghapus baris operasional duplikat eksak. Penanda waktu pada tingkat peristiwa dipertahankan alih-alih otomatis dianggap galat. Nilai yang tidak masuk akal ditandai namun tetap dipertahankan dalam kumpulan data audit.

Operasi	Tujuan
Rekonstruksi tanggal-waktu	Meneruskan tanggal harian ke baris shift dan menggabungkannya dengan waktu yang tercatat.
Penyeragaman skema	Memetakan kolom spesifik tahun ke medan bersama untuk vibrasi, tekanan, laju aliran, arus, daya, dan temperatur.
Standardisasi status	Mempertahankan Running, Standby, Breakdown, N/A, dan kosong sebagai keadaan yang berbeda.
Deduplikasi	Menghapus catatan operasional duplikat eksak sekaligus mempertahankan shift yang berulang namun tidak identik.

Operasi	Tujuan
Penanda kualitas	Menandai laju aliran tak masuk akal, pengukuran yang hilang, unit aktif yang tak teruraikan, dan medan spesifik skema.

Tabel 2. Operasi transformasi data pada Tahap 1.

4.2 Tahap 2: Ekstraksi peristiwa heuristik

Medan status dan catatan operator dianotasi menggunakan aturan kata kunci dan status yang transparan. Luarannya disebut penanda peristiwa heuristik atau kandidat peristiwa yang relevan bagi pemeliharaan. Catatan pengaturan proses rutin dan baris yang hanya berisi pergantian unit dikecualikan dari definisi kandidat peristiwa yang lebih ketat. Pergantian unit masuk ke kategori ketat hanya apabila baris yang sama juga memuat indikator eksplisit berupa ketidaktersediaan, kerusakan, perbaikan, relai/proteksi, kebocoran, atau seal.

Kategori kandidat	Contoh aturan	Penafsiran
Kerusakan/tidak tersedia	Status Breakdown; kata breakdown, trip, failed, not standby, atau unavailable dalam catatan	Indikator ketersediaan berprioritas tinggi; akar masalah tidak disimpulkan
Perbaikan	repair, maintenance, service, atau overhaul	Indikator tindakan pemeliharaan
Relai/proteksi	relay, protective, protektif, atau protection	Konteks kelistrikan/proteksi
Kebocoran/seal	leak, leaking, bocor, tubing, mechseal, atau seal	Konteks penahanan fluida atau seal
Pergantian unit	switch over, switchover, atau change over	Transisi operasional; menjadi kandidat peristiwa hanya bila ada indikator ketat lain
Uji operasi	test run, routine test, atau trial run	Pengujian operasional; menjadi kandidat peristiwa hanya bila ada indikator ketat lain
Penyetelan proses	LIC, recycle, valve, setting	Anotasi konteks operasi, bukan kandidat peristiwa relevan pemeliharaan bila berdiri sendiri

Tabel 3. Aturan anotasi peristiwa heuristik.

Penanda pada tingkat baris dapat mengulang catatan yang sama untuk banyak shift berurutan. Untuk memperoleh perkiraan jumlah episode, baris kandidat berurutan dengan tanda tangan kategori yang sama dan selang tidak lebih dari 24 jam digabungkan. Konsolidasi ini merupakan kemudahan audit dan bukan klaim bahwa batas episode yang dihasilkan tepat secara operasional.

4.3 Tahap 3: Pemprofilan deviasi temporal

Untuk unit i , variabel j , dan waktu t , himpunan rujukan historis hanya memuat observasi valid terdahulu dari unit yang beroperasi sama:

$$H(i,j,t) = \{x(i,j,\tau) : \tau < t \text{ dan unit yang beroperasi} = i\}$$

Setelah tersedia sedikitnya 30 observasi valid terdahulu, skor-z robust termodifikasi adalah:

$$Z(i,j,t) = 0.6745 [x(i,j,t) - \text{median}(H(i,j,t))] / \text{MAD}(H(i,j,t))$$

Jika MAD bernilai nol, simpangan baku terdahulu digunakan hanya apabila nilainya positif dan stabil; jika tidak, skor dinyatakan tidak tersedia. Nilai laju aliran yang tidak masuk akal tidak diizinkan memperbarui rujukan historis. Tiga rumpun profil dilaporkan secara terpisah:

- Profil vibrasi: vibrasi penyangga, pompa, ujung penggerak motor, dan ujung non-penggerak motor.

- Profil termal: temperatur belitan, bantalan, seal mekanis, dan badan-motor. Semuanya secara eksplisit diperlakukan sebagai peka terhadap beban.
- Profil proses/beban: tekanan isap, tekanan buang, laju aliran, ampere, dan daya.

Profil(t) = maks |Z(i,j,t)| atas semua variabel dalam rumpun tersebut

Aturan maksimum mengidentifikasi deviasi univariat paling ekstrem dalam satu rumpun. Aturan ini bukan jarak multivariat dan tidak memperhitungkan korelasi antarvariabel. Karena itu, setiap penanda sebaiknya disertai variabel penyumbang dominannya.

4.4 Analisis statistik

1. Mengagregasi vibrasi keseluruhan menjadi median harian untuk perbandingan inferensial pada tingkat tahun.
2. Menggunakan uji Kruskal-Wallis untuk perbandingan tiga tahun dan uji Mann-Whitney U dua sisi berpasangan dengan koreksi Holm.
3. Mengulang analisis deskriptif dan Kruskal-Wallis per unit yang beroperasi apabila tersedia sedikitnya lima hari pada dua tahun atau lebih.
4. Menghitung interval kepercayaan bootstrap blok-hari 95% untuk median tahunan dan proporsi penandaan profil temporal.
5. Memvariasikan ambang penandaan z-robust dari 2.5 hingga 5.0 dengan kelipatan 0.5.

Uji statistik mengidentifikasi perbedaan distribusi, bukan penyebab mekanisnya. Periode 2026 belum lengkap dan bauran unit sangat tidak berimbang, sehingga nilai-p ditafsirkan bersama arah efek, median, cakupan sampel, dan perbedaan skema.

5. Hasil

5.1 Distribusi unit yang beroperasi

Bauran operasi berubah secara materiil sepanjang periode studi. FP-P1C mendominasi sebagian besar baris operasi pada 2024 dan 2025, sedangkan FP-P1B mendominasi Januari-Mei 2026. FP-P1A menyumbang banyak baris pada 2024 tetapi sangat sedikit observasi operasi pada 2025 dan 2026. FP-P1D tercatat sebagai Running hanya pada 2025. Ketidakberimbangan ini menuntut penafsiran perubahan tingkat tahun secara terstratifikasi per unit.

Tahun	FP-P1A	FP-P1B	FP-P1C	FP-P1D	Tak teruraikan
2024	324	32	1,114	0	7
2025	4	18	1,256	119	5
2026	9	323	196	0	1

Tabel 4. Jumlah baris unit yang beroperasi menurut tahun.

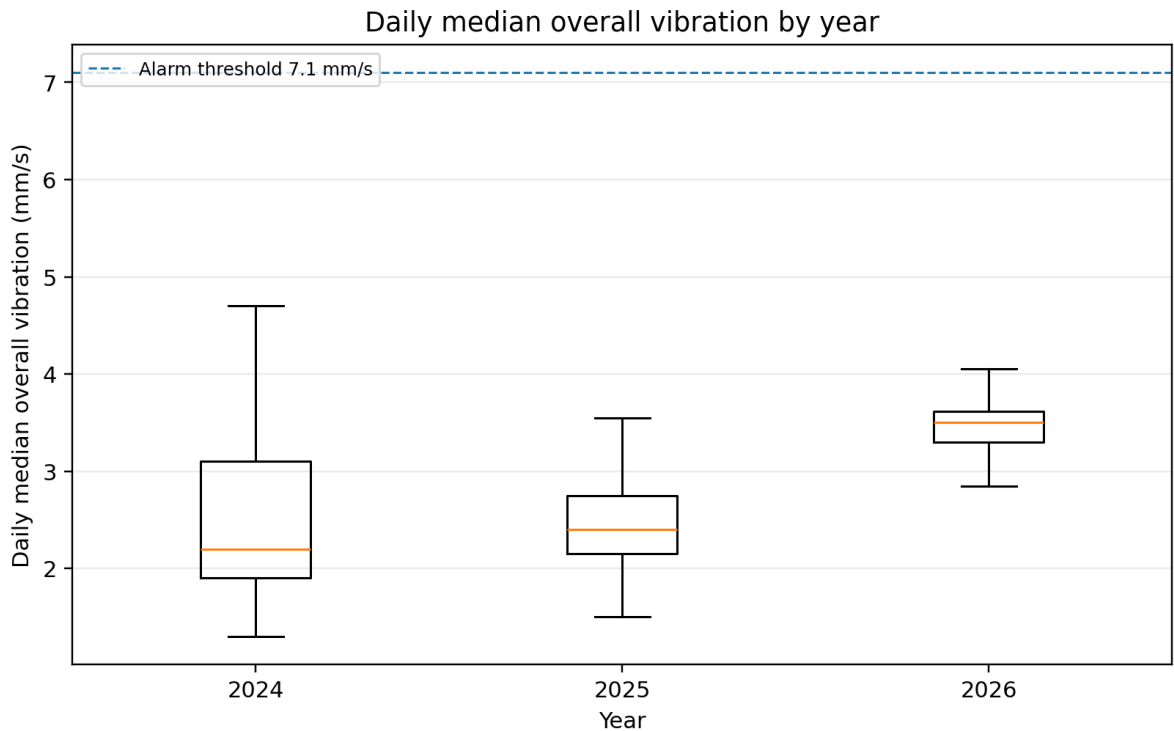
5.2 Distribusi vibrasi dan ketidakpastian

Tahun	n	Median	IK bootstrap blok 95%	IQR	Maksimum	>=4.5 mm/s
2024	1,466	2.3	2.20-2.30	1.9-3.1	6.3	1.8%
2025	1,394	2.4	2.40-2.50	2.2-2.8	5.8	1.1%
2026	525	3.5	3.50-3.50	3.3-3.7	5.7	3.8%

Tabel 5. Ringkasan vibrasi keseluruhan menurut tahun (mm/s).

Median tahunan meningkat dari 2.3 mm/s pada 2024 menjadi 2.4 mm/s pada 2025 dan 3.5 mm/s pada 2026. Tidak ada observasi yang melampaui batas alarm 7.1 mm/s maupun batas bahaya 11.3

mm/s (ISO, 2009). Karena itu, peningkatan tersebut merupakan pergeseran distribusi di bawah tingkat alarm tetap, bukan pelampauan alarm. Penjelasan yang mungkin meliputi perubahan peralatan secara bertahap, perbedaan bauran unit yang beroperasi, perubahan kondisi operasi, atau perluasan skema pengukuran 2026.



Gambar 2. Median harian vibrasi keseluruhan menurut tahun.

5.3 Perbandingan nonparametrik

Perbandingan	Statistik	Nilai-p terkoreksi	Penafsiran
Kruskal-Wallis: 2024, 2025, 2026	H=202.93	<0.001	Distribusi median harian berbeda antartahun
2024 vs 2025	U=55875.5	0.011	Pergeseran naik yang kecil
2024 vs 2026	U=6610.0	<0.001	Distribusi 2026 lebih tinggi
2025 vs 2026	U=3975.5	<0.001	Distribusi 2026 lebih tinggi

Tabel 6. Perbandingan nonparametrik median harian vibrasi.

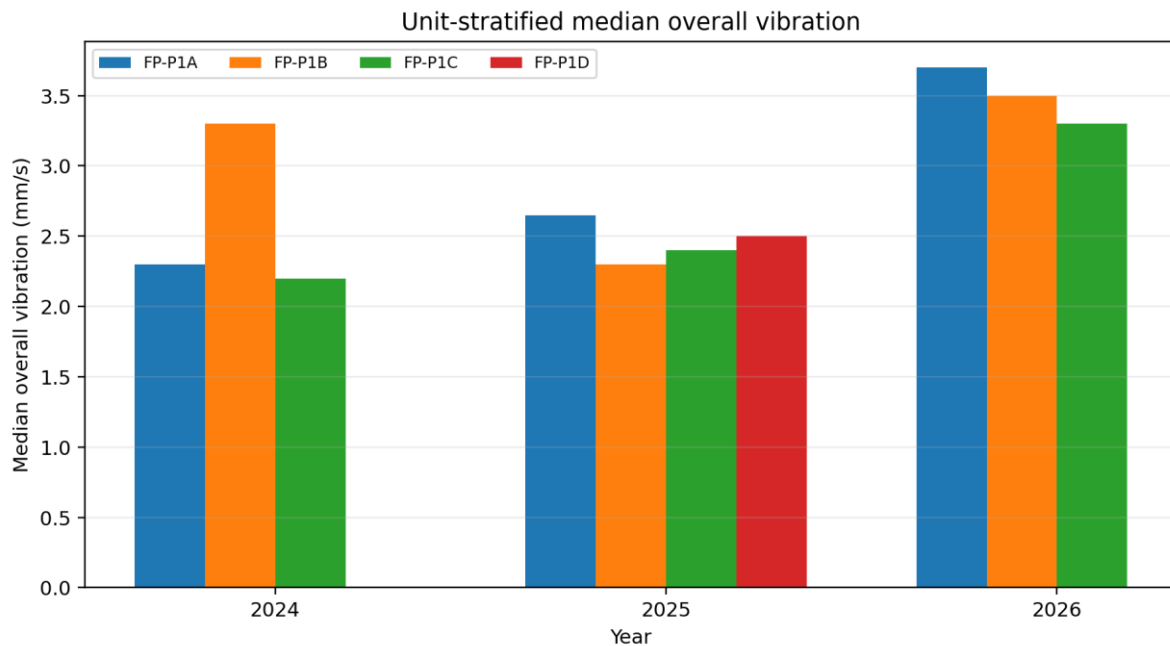
Hasil Kruskal-Wallis menunjukkan adanya efek tahun yang jelas pada distribusi median harian. Uji berpasangan menunjukkan bahwa perbedaan 2024-2025 relatif kecil, sedangkan kedua perbandingan yang melibatkan 2026 jauh lebih besar. Signifikansi statistik tidak mengidentifikasi sumber perubahan, dan periode 2026 hanya mencakup Januari-Mei.

5.4 Analisis vibrasi terstratifikasi per unit

Unit	Median menurut tahun (mm/s)	Jumlah hari menurut tahun	Statistik	Nilai-p
FP-P1A	2024: 2.35; 2026: 3.60	2024: 84; 2026: 5	H=7.11	0.008
FP-P1B	2024: 3.40; 2025: 2.35; 2026: 3.50	2024: 14; 2025: 11; 2026: 86	H=25.64	<0.001
FP-P1C	2024: 2.20; 2025: 2.35; 2026: 3.20	2024: 285; 2025: 316; 2026: 52	H=60.18	<0.001
FP-P1D	2025: 2.50	2025: 119 baris	Tidak diuji	Cakupan satu tahun

Tabel 7. Analisis median harian terstratifikasi per unit; FP-P1D dilaporkan secara deskriptif karena hanya tersedia satu tahun.

FP-P1C, unit dengan cakupan terbaik, meningkat dari median vibrasi harian 2.20 mm/s pada 2024 menjadi 2.35 mm/s pada 2025 dan 3.20 mm/s pada 2026 ($p < 0.001$). FP-P1B juga berbeda antartahun, tetapi cakupannya pada 2024 dan 2025 terbatas. FP-P1A hanya memiliki lima hari yang memenuhi syarat pada 2026, sehingga perbandingan signifikannya tidak boleh digeneralisasi. Hasil terstratifikasi konsisten dengan pergeseran naik pada 2026 yang tidak sepenuhnya dijelaskan oleh penggantian FP-P1C dengan FP-P1B, sekaligus tetap membuka kemungkinan penjelasan beban, skema, dan instrumentasi.



Gambar 3. Median vibrasi keseluruhan terstratifikasi per unit.

5.5 Penanda peristiwa heuristik

Tahun	Baris kandidat peristiwa	Perkiraan episode 24 jam	Baris pergantian unit	Baris kebocoran	Baris relai/proteksi
2024	40	9	8	2	0
2025	107	6	9	8	0
2026	271	8	8	18	253

Tabel 8. Penanda kandidat peristiwa heuristik. Jumlah baris bukan jumlah kegagalan unik.

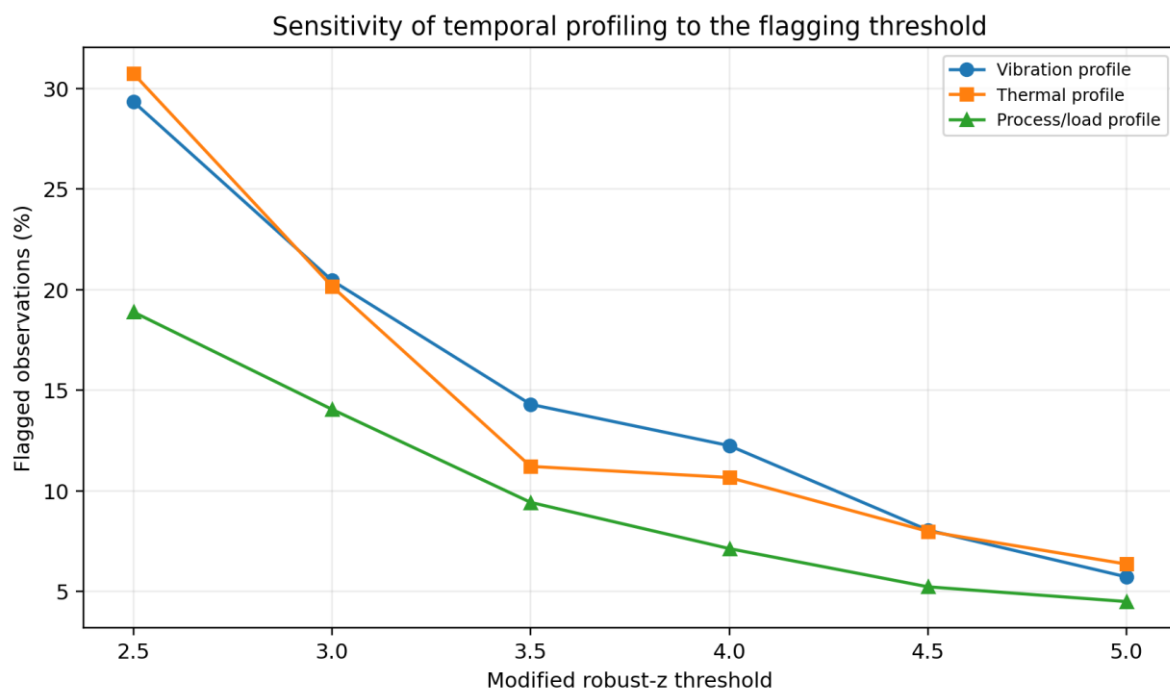
Tingginya jumlah baris pada 2026 sebagian besar didorong oleh catatan kerusakan/ketidakterersediaan dan relai/proteksi yang berulang pada shift-shift berurutan. Setelah konsolidasi perkiraan 24 jam, jumlah kandidat episode jauh lebih kecil. Perbedaan ini menunjukkan mengapa catatan operator yang berulang tidak boleh ditafsirkan sebagai peristiwa pemeliharaan yang independen. Baris pergantian unit tetap menjadi anotasi transisi operasional kecuali indikator kandidat peristiwa yang ketat hadir pada catatan yang sama.

5.6 Sensitivitas ambang

Ambang z-robust	Penanda vibrasi	Penanda termal	Penanda proses/beban
2.5	958 (29.3%)	1000 (30.7%)	617 (18.9%)
3.0	668 (20.5%)	656 (20.2%)	459 (14.1%)
3.5	467 (14.3%)	365 (11.2%)	308 (9.4%)
4.0	400 (12.3%)	347 (10.7%)	233 (7.1%)
4.5	263 (8.1%)	260 (8.0%)	171 (5.2%)
5.0	187 (5.7%)	207 (6.4%)	147 (4.5%)

Tabel 9. Sensitivitas jumlah penanda terhadap ambang z-robust.

Proporsi penandaan menurun tajam seiring naiknya ambang. Pada 2.5, sekitar 29.3% profil vibrasi yang tersedia ditandai; pada 5.0, proporsinya 5.7%. Sensitivitas ini menegaskan bahwa nilai 3.5 merupakan konvensi pelaporan, bukan ambang pemeliharaan yang tervalidasi. Karena itu, makalah ini melaporkan rentang sensitivitas penuh alih-alih menyajikan satu titik potong sebagai definitif.



Gambar 4. Sensitivitas pemprofilan temporal terhadap ambang penandaan.

5.7 Proporsi penanda dan interval kepercayaan bootstrap

Tahun	Rumpun profil	Ditandai / tersedia	Proporsi	IK bootstrap blok-hari 95%
2024	Vibrasi	275/1376	20.0%	16.2-23.9%
2024	Termal	89/1372	6.5%	4.7-8.4%
2024	Proses/beban	221/1376	16.1%	13.1-19.0%
2025	Vibrasi	138/1364	10.1%	7.4-13.0%
2025	Termal	222/1357	16.4%	13.1-19.8%
2025	Proses/beban	69/1365	5.1%	3.1-7.2%
2026	Vibrasi	54/525	10.3%	6.7-14.5%
2026	Termal	54/524	10.3%	6.8-14.2%
2026	Proses/beban	18/525	3.4%	1.7-5.3%

Tabel 10. Proporsi penanda profil temporal pada $|z| \geq 3.5$.

Proporsi bervariasi menurut rumpun profil dan tahun alih-alih bergerak dalam satu arah yang konsisten. Sebagai contoh, penanda profil vibrasi lebih sering muncul pada 2024 dibandingkan 2025

atau 2026, meskipun median vibrasi 2026 lebih tinggi. Hal ini terjadi karena rujukan yang mengembangkan menyesuaikan diri saat observasi baru terakumulasi, serupa dengan adaptasi terhadap pergeseran konsep (Gama et al., 2014), dan karena deviasi relatif berbeda dari tingkat keparahan absolut. Karena itu, pemrofilan temporal sebaiknya ditafsirkan bersama tren mentah dan ambang keteknikan tetap.

5.8 Kasus kualitas data

Tiga observasi laju aliran melampaui 100,000, jauh di atas rentang lazim yang berkisar 20,000-35,000. Ketiganya dipertahankan dalam arsip hasil transformasi, ditandai sebagai tidak masuk akal, dikecualikan dari pembaruan distribusi rujukan yang mengembangkan, dan ditafsirkan sebagai kasus proses/kualitas data. Validitasnya perlu diperiksa terhadap process historian, penskalaan instrumen, dan catatan operator sebelum kesimpulan keteknikan apa pun ditarik.

6. Diskusi

6.1 Kontribusi alur kerja tiga tahap

Kontribusi utamanya bersifat organisasional dan analitis alih-alih prediktif. Tahap 1 mengubah lembar kerja yang heterogen menjadi kumpulan data terwaktu yang dapat diaudit. Tahap 2 mengubah pola status dan catatan menjadi anotasi kandidat peristiwa yang transparan. Tahap 3 memrofilkan deviasi temporal tanpa menggunakan observasi masa depan. Secara bersama-sama, ketiga tahap berpotensi mendukung audit data, telaah tren, dan pemilihan catatan untuk pemeriksaan keteknikan.

Terminologinya sengaja dijaga tidak berlebihan. Penandaan berarti bahwa suatu aturan terpenuhi; pemrofilan berarti bahwa suatu pengukuran tidak lazim relatif terhadap catatan terdahulu. Kedua istilah tersebut tidak menyiratkan diagnosis, probabilitas kegagalan, atau sisa umur pakai.

6.2 Tren vibrasi versus batas tetap

Tidak adanya nilai di atas 7.1 mm/s tidak boleh mengaburkan perubahan distribusi. Median 2026 sebesar 3.5 mm/s jelas lebih tinggi daripada median 2024 dan 2025, dan uji median harian menunjukkan bahwa pergeseran tersebut dapat dideteksi secara statistik. Meskipun demikian, nilainya tetap di bawah batas alarm pabrik. Respons operasional yang tepat adalah penyelidikan tren, bukan klaim kegagalan pada tingkat alarm.

6.3 Pengaruh bauran unit yang beroperasi

Bauran operasi merupakan pengganggu utama. FP-P1C mendominasi 2024-2025, sedangkan FP-P1B mendominasi 2026. Analisis terstratifikasi menunjukkan bahwa FP-P1C sendiri juga memiliki median vibrasi lebih tinggi pada 2026, yang konsisten dengan pergeseran yang lebih luas. Namun, sel unit-tahun sangat tidak berimbang, dan FP-P1A serta FP-P1B memiliki cakupan yang jarang pada beberapa tahun. Model efek campuran atau model ternormalisasi rezim akan memerlukan observasi yang lebih berimbang dan lebih banyak variabel konteks operasi.

6.4 Makna kandidat peristiwa heuristik

Anotasi kandidat peristiwa mempertahankan konteks operasional yang berpotensi berguna, tetapi tetap peka terhadap ragam bahasa, ejaan, catatan berulang, dan aturan yang ditetapkan peneliti. Konsolidasi episode 24 jam mengurangi duplikasi baris yang jelas, tetapi tidak dapat menetapkan batas peristiwa yang sebenarnya. Karena itu, anotasi kandidat sebaiknya disajikan sebagai lapisan audit dan bukan sebagai jumlah peristiwa terverifikasi.

6.5 Pemanfaatan praktis

Alur kerja yang direvisi berpotensi mendukung tiga kegiatan praktis. Pertama, alur kerja ini mengidentifikasi masalah kualitas data yang perlu diperbaiki sebelum pemodelan yang lebih lanjut. Kedua, alur kerja ini menyediakan profil vibrasi, termal, dan proses/beban yang transparan untuk triase catatan. Ketiga, alur kerja ini menyoroti tren dan kandidat episode yang dapat diperiksa silang terhadap perintah kerja, data process historian, dan catatan inspeksi. Alur kerja ini tidak boleh digunakan untuk memicu pemeliharaan secara otomatis tanpa pemeriksaan tambahan tersebut.

7. Keterbatasan

1. Bias pencatatan operator: kondisi tidak lazim dapat terlewat, dibulatkan, disalin dari shift sebelumnya, atau dideskripsikan secara tidak konsisten. Keberadaan suatu catatan bergantung pada praktik operator selain pada keadaan peralatan.
2. Data hilang tidak secara acak: pengukuran dapat hilang karena unit tidak tersedia, sensor tidak dibaca, kolom tidak berlaku, atau operator tidak mengisi entri. Analisis yang mengasumsikan kehilangan data secara acak karena itu dapat menjadi bias.
3. Pengganggu beban dan titik operasi: vibrasi dan terutama temperatur, tekanan, laju aliran, arus, serta daya bervariasi menurut kondisi operasi. Profil berjendela mengembang tidak dapat membedakan degradasi dari perubahan beban tanpa normalisasi rezim atau pemodelan residu.
4. Ambiguitas artefak versus sinyal: perubahan skema, penskalaan instrumen, perubahan lokasi pengukuran, dan galat entri data dapat menimbulkan deviasi yang tampak nyata. Ketiga nilai laju aliran ekstrem menggambarkan risiko ini.
5. Keterbatasan generalisasi: studi ini mencakup satu sistem pompa di satu pabrik, dengan praktik pencatatan tertentu dan konfigurasi unit yang berubah. Hasilnya mungkin tidak dapat dialihkan ke pabrik, jenis pompa, atau sistem pengumpulan data lain.
6. Ketergantungan temporal: observasi per shift dan per hari berkorelasi secara serial. Agregasi harian dan bootstrap blok-hari mengurangi namun tidak menghilangkan ketergantungan ini.
7. Cakupan 2026 belum lengkap: periode 2026 berakhir pada Mei, sehingga perbandingan antartahun menggabungkan tahun penuh dengan tahun sebagian dan dapat memuat efek musiman atau efek periode operasi.
8. Aturan pemrofilan yang sederhana: skor-z robust termodifikasi maksimum merupakan aturan penandaan univariat yang mudah ditafsirkan, bukan model multivariat. Aturan ini mengabaikan korelasi dan dapat didominasi oleh satu variabel.

8. Kesimpulan

Studi ini merekonstruksi catatan shift pompa MOL multitahun sebagai alur kerja tiga tahap yang terdiri atas transformasi data, ekstraksi peristiwa heuristik, dan pemrofilan pencilaan robust temporal. Terminologi yang direvisi menggunakan anotasi peristiwa berbasis aturan, penanda kandidat peristiwa, dan pemrofilan temporal, sementara prosedur numeriknya dideskripsikan langsung sebagai metode z-robust termodifikasi berjendela mengembang.

Reanalisis menunjukkan pergeseran naik yang berarti pada vibrasi keseluruhan: median tahunan sebesar 2.3 mm/s pada 2024, 2.4 mm/s pada 2025, dan 3.5 mm/s pada Januari-Mei 2026. Uji nonparametrik atas median harian menunjukkan perbedaan antartahun yang signifikan, dan FP-P1C juga meningkat dalam analisis terstratifikasi per unit. Hasil ini mengindikasikan tren yang layak

ditelaah secara keteknikan, tetapi tidak membedakan perubahan peralatan dari efek beban, bauran operasi, skema, atau instrumentasi. Tidak ada observasi yang melampaui ambang alarm 7.1 mm/s.

Jumlah penanda sangat bergantung pada ambang, dan profil relatif tidak bergerak sejajar dengan tren vibrasi absolut. Karena itu, alur kerja ini paling tepat diperlakukan sebagai pendekatan audit data dan pemfilan yang eksploratif, yang berpotensi mendukung analisis pemeliharaan setelah verifikasi operasional dan normalisasi kontekstual tambahan.

Daftar Pustaka

- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024.
- Chandola, V., Banerjee, A., & Kumar, V. (2009). Anomaly detection: A survey. *ACM Computing Surveys*, 41(3), Article 15.
- Efron, B., & Tibshirani, R. J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall/CRC.
- Gama, J., Žliobaitė, I., Bifet, A., Pechenizkiy, M., & Bouchachia, A. (2014). A survey on concept drift adaptation. *ACM Computing Surveys*, 46(4), Article 44.
- Hodge, V. J., & Austin, J. (2004). A survey of outlier detection methodologies. *Artificial Intelligence Review*, 22, 85-126.
- Hollander, M., Wolfe, D. A., & Chicken, E. (2014). *Nonparametric Statistical Methods* (3rd ed.). Wiley.
- Iglewicz, B., & Hoaglin, D. C. (1993). *How to Detect and Handle Outliers*. ASQC Quality Press.
- ISO. (2009). ISO 10816-7:2009 Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications.
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483-1510.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Lei, Y., Li, N., Guo, L., Li, N., Yan, T., & Lin, J. (2018). Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 799-834.
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50-60.
- Rousseeuw, P. J., & Croux, C. (1993). Alternatives to the median absolute deviation. *Journal of the American Statistical Association*, 88(424), 1273-1283.
- Susto, G. A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S., & Beghi, A. (2015). Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(3), 812-820.
- Zonta, T., da Costa, C. A., da Rosa Righi, R., de Lima, M. J., da Trindade, E. S., & Li, G. P. (2020). Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106889.