

KARAKTERISASI *DECLINE PERFORMANCE* DAN ANOMALI TEKANAN PADA SUMUR GEOTHERMAL BERBASIS DATA *TIME SERIES*

Rastra Ardy Pratista¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Diyah Rosiani¹

¹Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, 58315

²Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Szeged, 13 Dugonics Square, 6720 Szeged

*E-mail: akhmads@esdm.go.id

ABSTRAK

Sistem panas bumi *vapor-dominated* menghadapi tantangan penurunan performa dan anomali tekanan pada sumur produksi. Penelitian ini mengkarakterisasi *decline performance* dan anomali tekanan pada tiga sumur produksi di lapangan panas bumi Y, Jawa Barat menggunakan data monitoring periode 1-20 Agustus 2024. Analisis korelasi Pearson digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antar parameter operasional, comparative analysis untuk evaluasi performa sumur, dan *ensemble anomaly detection* menggunakan *Z-score* dan *Interquartile Range* untuk deteksi anomali. Hasil menunjukkan korelasi kuat antara tekanan jalur dan suhu jalur ($r=0.980$), serta hubungan negatif kuat antara *wellhead pressure* dan *flow rate* pada Well X1 ($r=-0.814$) dan Well X3 ($r=-0.835$). Well X3 menunjukkan performa terbaik dengan *flow rate* rata-rata 44.22 t/hr dan *overall score* 94.33. Anomali terjadi di Well X2 yang mengalami penurunan produksi 23.97% dalam 20 hari dengan variabilitas tertinggi 11.52%. Pola anomali tekanan terjadi pada periode 4-7 Agustus 2024 di semua sumur dengan penurunan tekanan 1.09-1.29 barg dan temperatur 2.83-5.37°C. Anomali ini mengindikasikan gangguan sistem yang memerlukan investigasi. Penelitian ini menyediakan *framework* untuk monitoring dan optimasi produksi sumur geothermal berbasis analisis data *time-series*.

Kata kunci: geothermal, *decline performance*, anomali tekanan, analisis korelasi, *ensemble detection*

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi panas bumi 23.9 GW namun pemanfaatannya baru 9.3%. Lapangan panas bumi Y dengan kapasitas 235 MW menggunakan sistem *single-flash vapor-dominated* dimana fluida di dominasi uap dengan entalpi tinggi [1], [2]

Pemeliharaan kualitas uap menjadi hal penting agar turbin dapat bekerja optimal [3]. Penurunan kualitas uap dapat terjadi karena *carry-over* atau kandungan mineral tinggi dalam fluida. *Monitoring* performa sumur secara terus-menerus diperlukan untuk optimasi produksi menggunakan data tekanan, temperatur, dan laju alir [4], [5].

Sistem *monitoring wellhead pressure*, *flow rate*, dan *steam quality* penting untuk deteksi dini perubahan *reservoir* dengan *decline rate* normal 3-8% per tahun [6], [7]. Variasi produksi antar-sumur dipengaruhi geologi *reservoir* dan strategi operasi [8], namun penelitian umumnya menggunakan data bulanan, sehingga deteksi anomali operasional memerlukan data harian dengan metode statistik komprehensif [9].

Kesenjangan penelitian mencakup tiga hal. Pertama, belum ada karakterisasi *baseline* yang lengkap untuk variabilitas performa jangka pendek pada sistem *vapor-dominated* di Indonesia. Kedua, metodologi untuk mengidentifikasi anomali yang terjadi bersamaan pada beberapa sumur belum dikembangkan secara jelas [2], [3]. Ketiga, kombinasi berbagai metode statistik untuk penilaian performa belum banyak diterapkan dalam praktik *monitoring* operasional [10].

Penelitian ini bertujuan mengisi kesenjangan tersebut dengan melakukan penilaian terhadap *decline performance* dan anomali tekanan pada sumur produksi panas bumi. Metode korelasi, *comparative analysis*, dan *ensemble anomaly detection* digunakan pada data periode 1-20 Agustus 2024.

2. METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada tiga sumur produksi di lapangan panas bumi Y, Jawa Barat. Data *monitoring* harian periode 1-20 Agustus 2024 mencakup *wellhead pressure* (WHP) dalam satuan barg, tekanan jalur pipa dalam barg, temperatur jalur dalam derajat Celcius, dan *flow rate* dalam ton per jam [2], [4].

Monitoring wellhead pressure menunjukkan tekanan operasi 10-14 barg dengan tekanan jalur 10-13 barg dan temperatur jalur 185-194°C. Kondisi ini menunjukkan *saturated steam* sesuai karakteristik sistem *vapor-dominated* [1]. Data dikumpulkan melalui sistem SCADA yang terintegrasi dengan *vortex flowmeter* untuk laju alir, *pressure transducer* dengan akurasi $\pm 0.1\%$ untuk tekanan, dan RTD Pt100 untuk temperatur dengan resolusi 0.1°C [11].

B. Analisis Korelasi Pearson

Analisis korelasi digunakan untuk mengidentifikasi hubungan antar parameter operasional [12]. Koefisien korelasi *Pearson* mengukur kekuatan hubungan linear antara dua variabel dengan formula:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Nilai r berkisar dari -1 (hubungan negatif sempurna) hingga +1 (hubungan positif sempurna). Nilai 0 berarti tidak ada hubungan linear. Metode ini diterapkan pada semua pasangan parameter menghasilkan matriks korelasi 4×4.

Signifikansi statistik dinilai menggunakan *two-tailed t-test* dengan tingkat kepercayaan 0.05:

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

dengan *degrees of freedom* $df = n - 2 = 18$ untuk analisis per-sumur dan $df = 58$ untuk analisis gabungan. Interpretasi: $|r| < 0.3$ adalah korelasi lemah, $0.3 \leq |r| < 0.7$ adalah korelasi sedang, dan $|r| \geq 0.7$ adalah korelasi kuat [12].

C. Comparative Analysis untuk Penilaian Kinerja Antar Sumur

Evaluasi performa relatif antar sumur menggunakan statistik deskriptif dan *weighted multi-criteria scoring* [8]. Untuk setiap sumur, dihitung *mean* untuk menunjukkan performa rata-rata, *standard deviation* untuk melihat stabilitas kinerja, dan *coefficient of variation* untuk membandingkan variabilitas antar sumur:

$$cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3)$$

dimana σ adalah *standard deviation* dan $\bar{x}$ adalah *mean*. CV yang rendah menunjukkan operasi yang stabil [5].

Performance Index dihitung sebagai rasio produktivitas terhadap tekanan operasi [1]:

$$PI = \frac{\text{Mean Flow Rate (t/hr)}}{\text{Mean WHP (barg)}} \quad (4)$$

PI yang tinggi menunjukkan sumur mampu menghasilkan *flow rate* tinggi pada tekanan relatif rendah, yang berarti konektivitas *reservoir* baik [6].

Well performance dievaluasi menggunakan *weighted multi-criteria score* yang menggabungkan produktivitas, efisiensi tekanan, dan stabilitas operasional:

$$si = w_1 \left(\frac{Q_i}{Q_{max}} \right) \times 100 + w_2 \left(\frac{PI_i}{PI_{max}} \right) \times 100 + w_3 \left(\frac{CV_i}{CV_{max}} \right) \times 100 \quad (5)$$

dimana Q_i adalah *mean* laju alir sumur, PI_i adalah *Performance Index*, CV_i adalah *coefficient of variation*, dan bobot $w_1 = 0.40$ (produktivitas), $w_2 = 0.30$ (efisiensi), $w_3 = 0.30$ (stabilitas). Bobot ini mencerminkan prioritas operasional lapangan [8]. Normalisasi dilakukan dengan membagi nilai masing-masing sumur terhadap nilai maksimum kelompok, menghasilkan skor 0-100 untuk setiap komponen.

D. Ensemble Anomaly Detection

Dua metode digunakan untuk mendeteksi anomali dan meningkatkan kehandalan [13]. Metode *Z-score* mengukur penyimpangan dari nilai rata-rata dalam satuan *standard deviation*:

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (6)$$

Anomali didefinisikan jika $|z| > 2.5$, yang berarti data berada di luar 99% *confidence interval*.

Metode *Interquartile Range* (IQR) mendeteksi fluktuasi ekstrem menggunakan [14]:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \dots$$

$$\text{Outlier jika: } x < Q_1 - 1,5 \times IQR \text{ atau } x > Q_3 + 1,5 \times IQR \quad (7)$$

dimana Q_1 adalah *quartile* pertama (*percentile* 25) dan Q_3 adalah *quartile* ketiga (*percentile* 75). Mekanisme konsensus digunakan dimana *data point* dikategorikan sebagai *confirmed anomaly* jika terdeteksi oleh kedua metode secara bersamaan. Ini meningkatkan tingkat kepercayaan dan mengurangi kesalahan deteksi [13]. Anomali sinkron di definisikan sebagai anomali yang terjadi pada minimal dua dari tiga sumur dalam waktu yang berdekatan. Ini menunjukkan gangguan sistem bukan masalah sumur individual [2].

E. Production Change Analysis

Perubahan produksi dianalisis menggunakan persentase perubahan untuk mengukur tren produktivitas [5]:

$$\Delta Q(\%) = \frac{Q_{end} - Q_{start}}{Q_{start}} \times 100\% \quad (8)$$

dimana Q_{start} adalah *flow rate* pada awal periode observasi dan Q_{end} adalah *flow rate* pada akhir periode. Nilai positif berarti peningkatan produksi, sedangkan nilai negatif berarti penurunan produksi.

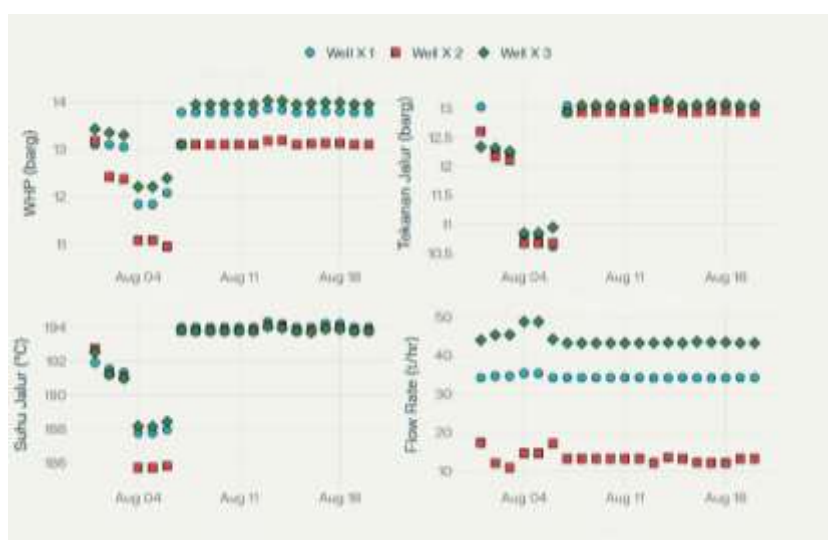
F. Implementasi Software

Seluruh analisis dilakukan menggunakan Python 3.10 dengan *libraries*: pandas 1.5.x untuk manipulasi data dan *time series handling*, NumPy 1.23.x untuk komputasi numerik, SciPy 1.10.x untuk *statistical testing* dan *correlation analysis*, serta Matplotlib 3.6.x dan Seaborn 0.12.x untuk visualisasi data.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data hasil monitoring periode 1 Agustus – 20 Agustus 2024

Gambar 1 menyajikan data monitoring tiga sumur produksi periode 1-20 Agustus 2024. Data menunjukkan anomali signifikan pada periode 4-7 Agustus dengan penurunan tekanan dan temperatur pada semua sumur [2].



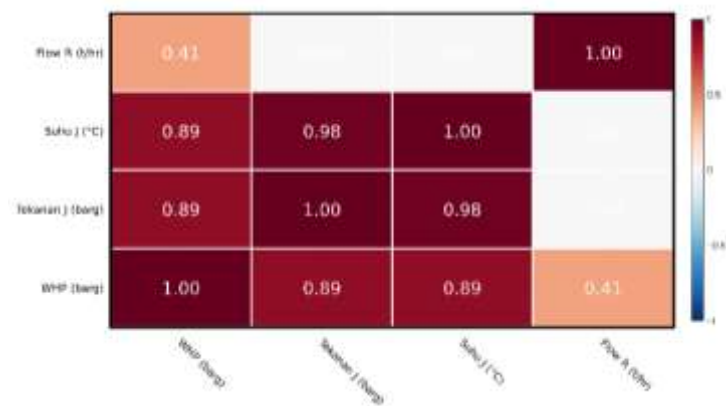
Gambar 1. Scatter Plot data monitoring 3 sumur periode 1-20 Agustus 2024

Scater plot pada Gambar 1 menampilkan puncak anomali terjadi pada tanggal 4-6 Agustus dengan tekanan dan temperatur terendah. Pemulihan cepat terjadi pada 7-8 Agustus dengan karakteristik overshoot pada Well X3 (mencapai 14.52 barg pada tanggal 7 Agustus sebelum stabil di 13.95 barg mulai tanggal 8 Agustus). Periode setelah pemulihan (8-20 Agustus) menunjukkan stabilitas operasional dengan tekanan dan temperatur lebih tinggi dibandingkan sebelum anomali [1].

B. Analisis Korelasi Antar Parameter Operasional

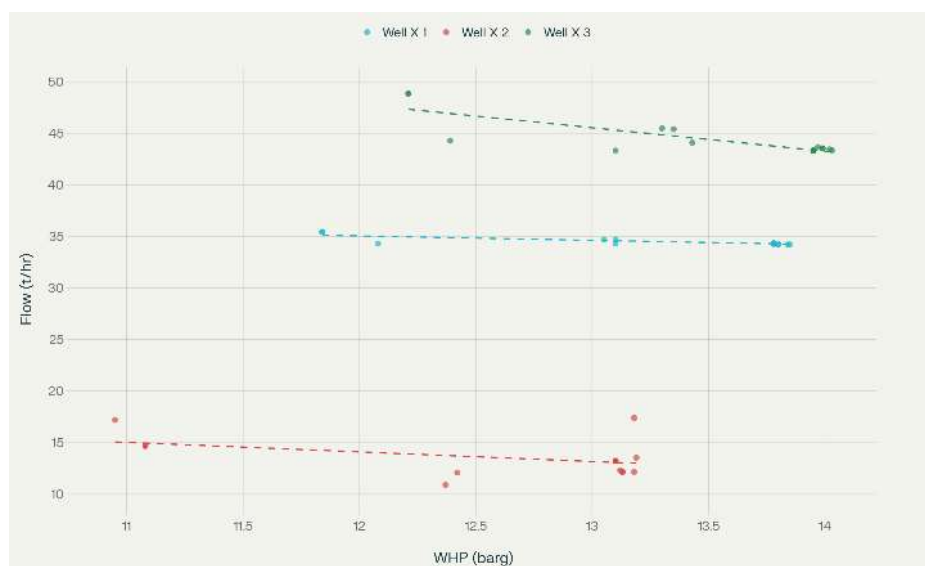
Analisis korelasi menggunakan metode *Pearson* untuk mengidentifikasi hubungan signifikan antar parameter operasional [12]. Gambar 2 menunjukkan *heatmap* korelasi *Pearson* yang mengungkap pola hubungan antar variabel. Matriks Korelasi *Pearson* Antar Parameter Operasional (*Heatmap* Korelasi *Pearson* menunjukkan korelasi kuat antara tekanan jalur dan suhu jalur ($r=0.980$), serta korelasi WHP dengan parameter lainnya)[12].

Heatmap pada Gambar 2 menunjukkan hasil korelasi kuat antara tekanan jalur dan suhu jalur dengan $r=0.980$ ($p<0.001$). Ini menunjukkan bahwa kedua parameter berubah secara bersamaan mengikuti kurva saturasi untuk kondisi *saturated steam* sesuai dengan sifat termodinamika sistem air-uap [1]. Korelasi yang kuat ini juga berfungsi sebagai pengecekan kualitas data dan memastikan bahwa pengukuran sensor konsisten dengan perilaku termodinamika yang diharapkan [11].



Gambar 2. Heatmap korelasi Pearson

Korelasi kuat juga ditemukan antara WHP dengan suhu jalur ($r=0.894$) dan tekanan jalur ($r=0.888$). Ini menunjukkan bahwa perubahan tekanan kepala sumur berdampak langsung pada kondisi *thermal system* melalui hubungan tekanan-temperatur dalam aliran dua fase [2], [3]. Gambar 2. menyajikan scatter plot hubungan WHP dan *flow rate* untuk masing-masing sumur secara terpisah untuk menghindari *Simpson's paradox* yang dapat muncul dari *pooled correlation*.



Gambar 3. Scatter Plot Korelasi WHP vs Flow Rate Per Sumur

Pada *scatter plot* Gambar 3, Well X1 menunjukkan korelasi negatif kuat dengan $r=-0.814$ ($p<0.001$). Ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kepala sumur menyebabkan penurunan laju alir produksi sesuai prinsip *pressure drawdown* dalam *reservoir engineering*

[6]. Ketika tekanan di kepala sumur tinggi, perbedaan tekanan antara *reservoir* dan *wellbore* mengecil sehingga mendorong lebih sedikit fluida ke permukaan.

Well X3 juga menunjukkan korelasi negatif kuat dengan $r=-0.835$ ($p<0.001$). Ini menggambarkan *wellbore* yang responsif dengan koneksi permeabilitas tinggi ke *reservoir* [1]. *Data points* Well X3 membentuk pola linear yang padat, menunjukkan perilaku yang dapat diprediksi. Sebaliknya, Well X2 memiliki korelasi negatif yang jauh lebih lemah dengan $r=-0.449$ ($p=0.047$). Ini menunjukkan bahwa *flow rate* tidak hanya dikontrol oleh WHP tetapi ada faktor lain yang dominan [2]. Faktor tersebut bisa berupa *unstable flow regime*, restriksi *wellbore* dari *scaling* atau *damage*, atau *variable steam quality* [3]. Korelasi lemah pada Well X2 juga tercermin dalam *scatter* yang lebih lebar, menunjukkan ketidakpastian operasional yang lebih tinggi.

C. Karakterisasi Performance Sumur Produksi

Analisis statistik deskriptif mengungkap perbedaan dalam karakteristik operasional ketiga sumur [5], [8]. Tabel 2 menyajikan ringkasan statistik untuk seluruh parameter kunci. Pada Tabel 2, Well X1 menunjukkan stabilitas tinggi (CV=1.02%, terendah) dengan *flow rate* rata-rata 34.45 t/hr dan *range* sempit 1.23 t/hr, menunjukkan konektivitas *reservoir* kuat [5], [6]. Well X2 menunjukkan karakteristik yang berbeda dengan CV tertinggi sebesar 11.52%. Ini menunjukkan variabilitas operasional tinggi [2]. *Flow rate* rata-rata hanya 13.42 t/hr, sekitar 61% lebih rendah dari Well X1 dan 69% lebih rendah dari Well X3. *Range* produksi yang lebar (6.5 t/hr, atau 48% dari *mean*) menggambarkan perilaku yang tidak stabil. *Standard deviation* yang tinggi (1.545 t/hr) relatif terhadap mean menunjukkan ada banyak faktor penyebab seperti kerusakan *wellbore*, akumulasi *scaling*, atau *cycling behavior* dalam aliran dua fase [3].

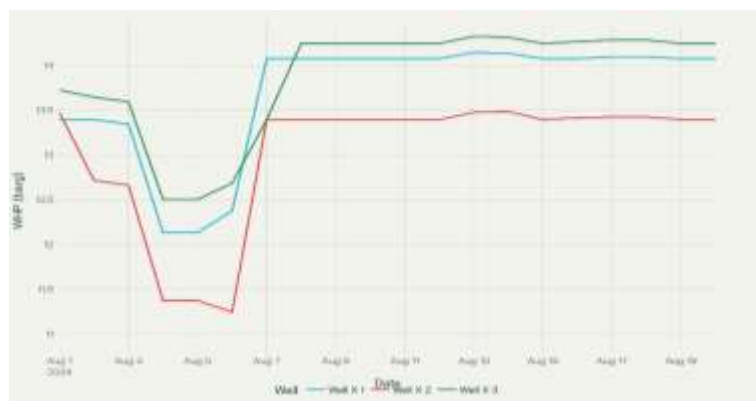
Tabel 1. Statistik Deskriptif Parameter Operasional Per Sumur

Parameter	Well X1	Well X2	Well X3	Unit
Flow Rate				
Mean	34.45	13.42	44.22	t/hr
Std Dev	0.351	1.545	1.672	t/hr
CV	1.02	11.52	3.78	%
Min	34.21	10.9	43.32	t/hr
Max	35.44	17.4	48.85	t/hr
Range	1.23	6.5	5.53	t/hr
WHP				
Mean	13.47	12.74	13.55	barg
Std Dev	0.924	0.983	0.561	barg
CV	6.86	7.71	4.14	%
Performance Index				
PI	2.56	1.05	3.26	t/hr/barg
Ranking	2	3	1	-

Well X3 menunjukkan kombinasi produktivitas tinggi dan stabilitas baik. *Flow rate* rata-rata 44.22 t/hr merupakan tertinggi, sekitar 28% lebih tinggi dari Well X1 dan 230% lebih tinggi dari Well X2. CV sebesar 3.78% menunjukkan stabilitas yang baik meskipun dengan produktivitas tinggi [8]. Ini menunjukkan kualitas *reservoir* yang baik dengan zona produktif yang besar dan karakteristik permeabilitas yang menguntungkan. WHP *mean* 13.55 barg dengan CV terendah 4.14% menunjukkan perilaku tekanan yang konsisten yang mendukung produksi stabil [1].

Line chart pada Gambar 4 menampilkan *monitoring* multi-parameter dari ketiga sumur produksi sepanjang periode observasi, mengungkap pola temporal dan anomali yang terjadi bersamaan. *Time series* menunjukkan Well X3 mengalami *overshoot peak* mencapai 14.52 barg pada 7 Agustus (setelah pemulihan), kemudian stabil pada 13.95 barg pada 8 Agustus. Pola *overshoot* menunjukkan adanya intervensi aktif untuk memulihkan sistem [2].

Time series plot pada Gambar 3 menunjukkan periode stabil sebelum anomali (1-3 Agustus), penurunan tajam pada 4 Agustus, periode tekanan rendah (4-6 Agustus), pemulihan tajam pada 7 Agustus dengan *overshoot* (Well X3 *peak at* 14.52 barg), dan stabilisasi baru pada *level* lebih tinggi (8-20 Agustus dengan Well X3 at 13.95 barg).



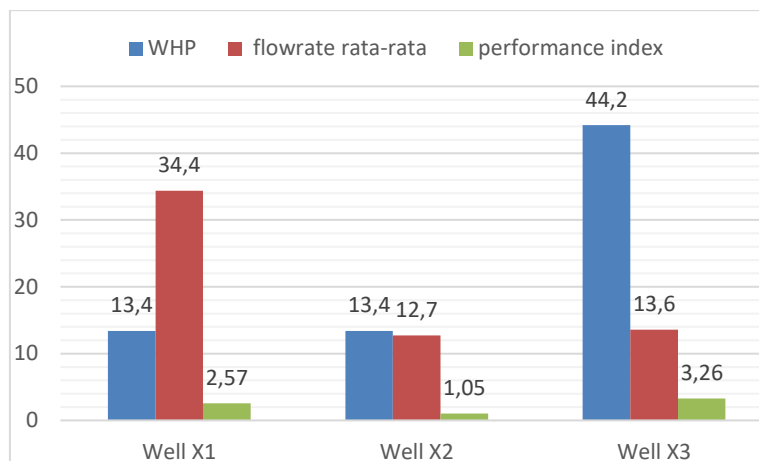
Gambar 4. Line chart Monitoring Multi-Parameter Wellhead Pressure

Visualisasi time series mengungkap beberapa hal penting. Periode sebelum anomali (1-3 Agustus) menunjukkan *baseline* yang stabil dengan Well X1 dan X3 mempertahankan *level* WHP konsisten sekitar 13.1-13.4 barg, sementara Well X2 sedikit lebih rendah pada 12.4-13.2 barg. Periode anomali (4-7 Agustus) terlihat jelas sebagai penurunan pada semua sumur dengan titik terendah pada 4-6 Agustus [2]. Fase pemulihan (7 Agustus) menunjukkan peningkatan tajam dengan sedikit *overshoot*, diikuti stabilisasi. Periode setelah pemulihan (8-20 Agustus) menunjukkan keseimbangan baru yang sedikit lebih tinggi dari *baseline* sebelum anomali. Ini menunjukkan penyesuaian *setpoint* operasional atau perubahan tekanan *gathering system* [8].

D. Analisis Performa Komparatif dan Performance Index

Performance Index menggabungkan produktivitas dan efisiensi tekanan untuk *ranking* sumur yang lengkap [1], [5]. Gambar 5 menyajikan perbandingan metrik performa antar sumur. *Bar chart* pada Gambar 5 menunjukkan Well X3 unggul di semua metrik (*flow rate* 44.2 t/hr, PI 3.26), diikuti Well X1 (*flow rate* 34.4 t/hr, PI 2.57), dan Well X2 tertinggal jauh (*flow rate* 13.4 t/hr, PI 1.05).

Perhitungan *Performance Index* menunjukkan Well X3 dengan nilai tertinggi 3.26 ton/hr/barg. Ini menunjukkan efisiensi yang baik dalam mengubah perbedaan tekanan menjadi mass flow rate [1]. Well X1 memiliki PI sedang sebesar 2.56, sekitar 21% lebih rendah dari Well X3 namun masih 144% lebih tinggi dari Well X2. Well X2 menunjukkan PI terendah hanya 1.05, menggambarkan produktivitas buruk relatif terhadap tekanan operasi [6]. *Gap* yang besar antara Well X3 dan Well X2 (faktor 3.1) menunjukkan perbedaan dalam konektivitas *reservoir*, kondisi *wellbore*, atau efektivitas *completion* [2].



Gambar 5. Perbandingan Performance Index dan Metrik Produktivitas

Total produksi untuk periode 20 hari dihitung. Well X3 menghasilkan 21,226 ton, jauh lebih tinggi dibandingkan Well X1 dengan 16,536 ton dan Well X2 dengan hanya 6,442 ton. Kontribusi Well X2 hanya 15% dari total produksi lapangan, meskipun mewakili 33% dari sumur produksi. Ini menunjukkan *underperformance* yang memerlukan tindakan perbaikan [5], [8].

Weighted multi-criteria scoring digunakan yang menggabungkan *flow rate* (40%), *Performance Index* (30%), dan *stability* (30%) dengan normalisasi sebagai berikut:

- Komponen Produktivitas: $(Q_i/Q_{\max}) \times 100$
- Komponen Efisiensi: $(PI_i/PI_{\max}) \times 100$
- Komponen Stabilitas: $[1 - (CV_i/CV_{\max})] \times 100$

Hasilnya: Well X3 = 94.33 (*excellent*), Well X1 = 76.43 (*good*), dan Well X2 = 12.72 (*poor*). Perbedaan *scoring* yang besar antara Well X1 dan Well X2 (faktor 6) menggambarkan tidak hanya *gap* produktivitas tetapi juga masalah stabilitas pada Well X2 [8]. *Score* Well X3 mendekati sempurna (100) menunjukkan performa hampir optimal di semua dimensi yang dievaluasi.

E. Production Change Analysis

Perubahan produksi sepanjang periode observasi mengungkap tren berbeda untuk masing-masing sumur [5]. Well X1 menunjukkan perubahan produksi minimal dari 34.3 t/hr (01 Agustus) ke 34.33 t/hr (20 Agustus), mewakili peningkatan sebesar +0.087% atau produksi datar dengan tidak ada tren penurunan signifikan. Stabilitas ini menunjukkan rezim produksi yang berkelanjutan dengan pemeliharaan tekanan *reservoir* yang seimbang [6].

Well X2 menunjukkan penurunan produksi yang mengkhawatirkan dari 17.4 t/hr (01 Agustus) ke 13.23 t/hr (20 Agustus), mewakili penurunan sebesar 23.97% dalam periode 20 hari. Besaran penurunan ini jauh melebihi variabilitas operasional normal dan menunjukkan degradasi bertahap [2]. Ini kemungkinan disebabkan oleh akumulasi *scaling*, penurunan permeabilitas, atau kerusakan *wellbore* [3]. Laju penurunan sekitar 1.2% per hari merupakan indikator serius yang memerlukan investigasi segera untuk mencegah kehilangan produktivitas lebih lanjut [10].

Well X3 menunjukkan penurunan produksi kecil dari 44.09 t/hr (01 Agustus) ke 43.32 t/hr (20 Agustus), mewakili penurunan sebesar 1.75%. Besaran penurunan ini masih dalam batas yang dapat diterima untuk fluktuasi operasional normal [5]. Namun demikian, *monitoring*

berkelanjutan diperlukan untuk memastikan penurunan tidak semakin cepat dan menjaga keberlanjutan produksi [8].

Perbedaan dalam pola perubahan produksi menggambarkan perbedaan kondisi *reservoir* dan *wellbore* yang mendasari [6]. Well X1 dengan produksi yang datar menunjukkan dukungan *reservoir* yang baik dan gangguan minimal dari faktor operasional. Well X2 dengan penurunan cepat menunjukkan masalah integritas *wellbore* atau masalah *deliverability reservoir* yang memerlukan intervensi [2]. Well X3 dengan penurunan minimal menunjukkan kesehatan *reservoir* yang baik dengan sedikit penurunan alami yang konsisten dengan perilaku lapangan panas bumi [1].

F. Deteksi dan Karakterisasi Anomali Tekanan Sinkron

Ensemble anomaly detection mengidentifikasi anomali tekanan yang terjadi bersamaan pada periode 4-7 Agustus 2024 yang mempengaruhi semua sumur secara simultan [13]. Gambar 5 menampilkan *box plot* distribusi *flow rate* untuk visualisasi pola *outlier*. *Box plot* pada Gambar 6 menunjukkan Well X1 memiliki distribusi padat dengan 2 *outliers* pada *range* atas, Well X2 memiliki distribusi luas dengan 1 *outlier*, dan Well X3 memiliki distribusi sedang dengan 2 *outliers* yang jelas pada *range* atas.



Gambar 6. Box Plot Distribusi Flow Rate dan Outlier Detection

Analisis WHP mengungkap penurunan tekanan yang terjadi bersamaan pada tanggal 4 Agustus. Penurunan WHP terjadi pada semua sumur: Well X1 (1.21 barg, 9.27%), Well X2 (1.29 barg, 10.43%), dan Well X3 (1.09 barg, 8.20%). Besaran penurunan yang besar dan *timing* yang identik di semua sumur menunjukkan penyebab *eksternal sistem-wide* bukan masalah sumur individual [2].

Tekanan jalur mengkonfirmasi sifat bersamaan dari *event* ini. Well X1 mengalami penurunan dari 12.23 barg ke 10.82 barg (penurunan 1.41 barg), Well X2 dari 12.11 barg ke 10.68 barg (penurunan 1.43 barg), dan Well X3 dari 12.26 barg ke 10.85 barg (penurunan 1.41 barg). Konsistensi dalam besaran penurunan tekanan jalur (*range* 1.41-1.43 barg) menunjukkan gangguan *gathering system* yang umum atau masalah *pressure control downstream* [8].

Temperatur menunjukkan penurunan yang sesuai dengan hubungan tekanan-temperatur dalam *saturated steam* [1]. Well X1 mengalami penurunan temperatur dari 191.34°C ke 187.77°C (penurunan 3.57°C), Well X2 dari 191.09°C ke 185.72°C (penurunan 5.37°C), dan Well X3 dari 191.00°C ke 188.17°C (penurunan 2.83°C). Penurunan temperatur *range* 2.83-

5.37°C mengikuti perilaku kurva saturasi dimana tekanan lebih rendah sesuai dengan temperatur saturasi lebih rendah. Well X2 menunjukkan penurunan temperatur terbesar konsisten dengan penurunan tekanan terbesar, menjaga konsistensi termodinamika [2].

Respons flow rate selama periode anomali menunjukkan pola yang menarik. Well X1 mengalami sedikit peningkatan dari 34.69 t/hr ke 35.44 t/hr (+2.2%), Well X2 meningkat dari 10.9 t/hr ke 14.68 t/hr (+34.7%), dan Well X3 peningkatan signifikan dari 45.48 t/hr ke 48.85 t/hr (+7.4%). Peningkatan *flow rate* meskipun tekanan turun menunjukkan bahwa *backpressure* lebih rendah dalam *gathering system* mengizinkan sumur untuk memproduksi pada *rate* lebih tinggi sementara [6]. Ini konsisten dengan perilaku *self-flowing well* dimana pengurangan *wellhead pressure* meningkatkan *drawdown* dan meningkatkan kapasitas produksi.

Fase pemulihan pada 7 Agustus menunjukkan pemulihan cepat dengan *overshoot* yang signifikan, terutama pada Well X3. Well X1 pulih ke 13.78 barg (+5.6% di atas baseline sebelum event), Well X2 ke 13.1 barg (+5.9% overshoot), dan Well X3 mengalami *overshoot* dramatis ke 14.52 barg (tertinggi dalam seluruh periode observasi dan 9.1% di atas *baseline*) dengan tekanan jalur mencapai 13.89 barg dan temperatur 195.21°C pada tanggal 7 Agustus. Nilai ini kemudian turun dan stabil pada 13.95 barg mulai tanggal 8 Agustus (+4.9% di atas *baseline original*). Pola *overshoot* menunjukkan adanya intervensi aktif atau tindakan perbaikan bukan pemulihan pasif [2]. Ini kemungkinan melibatkan penyesuaian tekanan *gathering system* atau modifikasi operasi separator. Stabilisasi setelah pemulihan periode 8-20 Agustus menciptakan keseimbangan baru sekitar 6-8% lebih tinggi dari *baseline original*. Ini menunjukkan perubahan setpoint operasional permanen [8].

Outlier detection menggunakan metode IQR mengidentifikasi *data points* spesifik yang melebihi *threshold* variabilitas normal [14]. Well X1 memiliki 2 *outliers* pada *flow rate* (35.44 dan 35.43 t/hr pada 4-5 Agustus), bertepatan dengan periode anomali. Well X2 menunjukkan 1 *flow rate outlier* pada 1 Agustus (17.4 t/hr) mewakili *spike* sebelum anomali. Well X3 memiliki 2 *flow rate outliers* (48.85 t/hr pada 4-5 Agustus) mewakili *peak production* selama periode *backpressure* rendah. *Total outliers* relatif terhadap ukuran dataset (10% untuk Well X1 dan X3, 5% untuk Well X2) menunjukkan operasi umumnya stabil dengan *specific anomalous events* bukan instabilitas kronis [13].

Z-score dengan *threshold* 2.5 memberikan deteksi anomali yang saling melengkapi. Konsistensi antara metode IQR dan *Z-score* dalam mengidentifikasi periode anomali yang sama meningkatkan kepercayaan dalam klasifikasi anomali dan mengurangi kesalahan deteksi positif palsu [13]. Anomali yang dikonfirmasi oleh kedua metode mewakili kejadian operasional yang sesungguhnya yang memerlukan investigasi bukan hanya *artifacts* statistik atau *noise* pengukuran.

Analisis penyebab untuk anomali yang terjadi bersamaan mengarah pada *gathering system* atau *power plant related event* [2], [8]. Skenario yang mungkin mencakup gangguan separator yang mengurangi *upstream pressure*, penutupan sebagian *isolation valve pipeline* yang menciptakan pengurangan *backpressure*, penurunan beban *power plant* yang mengurangi *steam demand* dan menyebabkan penurunan *backpressure*, atau *breakthrough injection well* yang mempengaruhi rezim tekanan *field-wide* [3]. *Timing* (transisi *overnight* 3-4 Agustus) konsisten dengan *typical maintenance window* atau skenario gangguan *grid*. Durasi (tekanan rendah *sustained* 2-3 hari) menunjukkan masalah yang memerlukan investigasi dan tindakan perbaikan bukan hanya *transient* singkat. Pola pemulihan tajam dengan *overshoot* menunjukkan intervensi yang disengaja berhasil menyelesaikan masalah yang mendasari.

G. Implikasi Operasional dan Rekomendasi

Temuan dari analisis ini memiliki beberapa implikasi operasional penting [5], [8]. Performa Well X3 (PI=3.26, score=94.33, penurunan minimal) menjadi acuan untuk operasi

optimal dan harus dipertahankan sebagai *primary baseload producer* [1]. Strategi operasional saat ini untuk Well X3 tampak tepat dan harus dilanjutkan dengan *monitoring* berkelanjutan untuk memastikan keberlanjutan. *Production logging* bulanan dan *reservoir pressure surveys semi-annual* direkomendasikan untuk deteksi dini dari *potential decline trends* [6].

Well X1 dengan stabilitas (CV=1.02%) mewakili aset produksi yang handal ideal untuk *load-following applications* [5]. Tren produksi datar (+0.087% over 20 hari) menunjukkan dukungan *reservoir* yang baik dan pemeliharaan tekanan yang seimbang. Ada peluang untuk peningkatan produksi melalui optimasi *wellhead pressure*, kemungkinan meningkatkan *flow rate* 5-10% tanpa mengorbankan stabilitas [10]. *Quarterly performance reviews* direkomendasikan untuk mendeteksi perubahan kecil dan menjaga kehandalan tinggi.

Well X2 memerlukan perhatian segera mengingat metrik performa yang buruk (PI=1.05, *score*=12.72) dan penurunan produksi yang mengkhawatirkan (23.97% dalam 20 hari) [2], [10]. Tindakan segera yang direkomendasikan mencakup *pressure buildup test* untuk menilai *deliverability reservoir versus wellbore damage*, *wellhead steam sampling* untuk *steam quality* dan *chemistry analysis*, *production logging* untuk mengidentifikasi *flow restrictions* dan *contribution profile*, *downhole video* atau *caliper logging* untuk inspeksi *wellbore condition* dan mengukur *scaling* atau *damage* [3], serta *wellhead equipment inspection* untuk memverifikasi *valve operation* dan *instrumentation accuracy* [11].

4. SIMPULAN

Karakterisasi decline performance tiga sumur produksi menggunakan metode statistik terintegrasi periode 1-20 Agustus 2024 menunjukkan Well X3 dengan performa terbaik (*score* 94.33, PI 3.26), Well X1 stabil (CV 1.02%), dan Well X2 memerlukan intervensi (penurunan 23.97%, *score* 12.72). Anomali tekanan sinkron teridentifikasi pada periode 4-7 Agustus 2024 yang mempengaruhi semua sumur secara simultan dengan penurunan *wellhead pressure* 1.09-1.29 barg, penurunan tekanan jalur 1.41-1.43 barg, dan penurunan temperatur 2.83-5.37°C. Fase pemulihan pada 7 Agustus menunjukkan karakteristik *overshoot* dengan Well X3 mencapai *peak* 14.52 barg sebelum stabil di 13.95 barg mulai 8 Agustus. *Timing* yang identik dan pola pemulihan seragam menunjukkan *system-wide event* yang kemungkinan terkait gangguan *gathering system* atau variasi beban *power plant*. Penelitian ini menyediakan *framework monitoring* dan optimasi produksi sumur *geothermal* berbasis analisis data *time-series* dengan rekomendasi operasional mencakup mempertahankan strategi Well X3, optimasi produksi Well X1, dan *priority intervention* untuk Well X2 melalui *pressure buildup testing*, *production logging*, dan *wellbore integrity evaluation* untuk meningkatkan produktivitas *field-level*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.A. Jamito, F.R. Husyan, J. Catipay, and J.F.P., "Geothermal System: Vapor-Dominated and Liquid-Dominated Geothermal Systems," 2004.
- [2] A. Sofyan, J. Szanyi, and A. S. Hari, "Investigation of Zone and Type of Scaling Based on the Fluid Flow Pattern in the Geothermal Well 'X' at the Salak Geothermal Field-Indonesia," *Int. J. Renewable Energy Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 192-202, 2024.
- [3] A. Sofyan, S. Wiharti, J. Szanyi, B. Yudho Suranta, and R. Njeru, "Determination of Scaling Zone and Scaling Type in Slotted Liner Based on the Fluid Flow Pattern in the Geothermal Well 'X'," *Int. J. Renewable Energy Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 276-286, 2023.
- [4] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, B. Y. Suranta, and S. M. A. Ratasya, "Heat loss effect analysis by using JIWAFlow wellbore simulation in geothermal field Well-Y," in 3rd Borobudur International

- Symposium on Science and Technology 2021, vol. 2706, no. 1, p. 020116, AIP Publishing LLC, May 2023.
- [5] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, and D. C. Dewi, "Analysis Of The Z Well Production Test Using The Horizontal Lip Pressure Method At Pt. Pertamina Geothermal Energy Ulubelu Area," Indonesian J. Energy and Mineral, vol. 3, no. 1, pp. 40-55, 2023.
 - [6] M.A. Grant, I.G. Donaldson, and P.F. Bixley, Geothermal Reservoir Engineering, 2nd ed. Academic Press, 2013.
 - [7] A. Sofyan, H. S. Aka, B. Y. Suranta, and S. M. A. Ratasya, "Analysis of Scale Saturation Index (SSI), Scale Formation Rate, and Scale Formation Time Based on Geothermal Production Well Head Pressure at Well 'X'," Indonesian J. Energy and Mineral, vol. 1, no. 1, pp. 26-33, 2021.
 - [8] A. Garg, B. Paul, M. Mackenzie, and D. Blackwell, "Analysis of Geothermal Reservoir and Well Operational Conditions Using Monthly Production Reports from Nevada and California," NREL/TP-5700-84668, Golden, CO, USA, 2017.
 - [9] J. Nogara and S.J. Zarrouk, "Corrosion in geothermal environment: Part 2: Metals and alloys," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 1347-1363, 2018.
 - [10] A. Sofyan, "Scale formation and treatment plan in Indonesian geothermal wells," Doctoral dissertation, University of Szeged, 2025.
 - [11] M.H. Mubarak, A. Yani, A.J. Nugroho, et al., "Geoflowtest - A Portable Device for Realtime Monitoring of Geothermal Production Well Testing," Proc. Stanford Geothermal Workshop, Stanford, CA, 2025.
 - [12] J. Cohen, P. Cohen, S.G. West, and L.S. Aiken, Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences, 3rd ed. New York: Routledge, 2003.
 - [13] S. Ahmad, A. Lavin, S. Purdy, and Z. Agha, "Unsupervised real-time anomaly detection for streaming data," Neurocomputing, vol. 262, pp. 134-147, Nov. 2017.
 - [14] J.W. Tukey, Exploratory Data Analysis. Reading, MA: Addison-Wesley, 1977.
 - [15] A. Sofyan, H. S. Aka, and M. B. Ermanda, "Redesign Of Well Pad 'X' Geothermal Separator with Demister Pad to Increase Separator Efficiency to Get Maximum Steam and Brine Separation in the Field 'Y'," in Der Digital German Geothermie Kongress 2020, pp. 1-15, 2020.
 - [16] A. Sofyan, H. S. Aka, A. M. Rizaldy, and B. Y. Suranta, "Development of Indonesian Wellhead Generating Unit (Small Scale) Based on Legal and Regulation of PT. Geo Dipa Dieng: A Case Study," in 2nd Borobudur International Symposium on Science and Technology (BIS-STE 2020), pp. 72-82, Atlantis Press, Aug. 2021.
 - [17] A. Sofyan, R. Jaya, H. Susanto, R. M. Njeru, G. Bozsó, and J. Szanyi, "Scale Treatment Planning Using Broaching Method in a Vapor-Dominated Geothermal Well X at Kamojang Geothermal Field," Eng, vol. 6, no. 4, p. 67, 2025.
 - [18] K. Pudiastuti and R. Setiati, "Optimasi Deliverabilitas Sumur-sumur Geothermal di dalam Cluster C dengan Mempertimbangkan Skenario Penurunan Produksi," PETRO, vol. 4, 2018.

Daftar Simbol

r	=	Nilai koefisien korelasi Pearson
x_i, y_i	=	Nilai individu dari variabel X dan Y
$\bar{x}, \bar{y}$	=	Rata-rata dari variabel X dan Y
df	=	Derajat kebebasan
t	=	Nilai t-hitung
n	=	Jumlah sampel (pasangan data)
σ	=	Simpangan baku
CV	=	koefisien variasi
PI	=	Indeks performa sumur
SI	=	Nilai akhir performa sumur
Q_i	=	Laju alir rata-rata sumur, t/hr
Q_{max}	=	Laju alir maksimal sumur, t/hr
PI_{max}	=	Nilai PI maksimum
CV_{max}	=	Nilai CV maksimum
w_1, w_2, w_3	=	Bobot masing-masing parameter
Z	=	Z-score, Nilai baku / nilai standar

IQR	=	Rentang antar kuartil
Q_1, Q_3	=	Kuartil pertama (25% data terbawah), Kuartil ketiga (75% data terbawah)
ΔQ	=	Persentase perubahan laju alir, %
Q_{start}	=	Laju alir pada awal periode observasi, t/hr
Q_{end}	=	Laju alir pada akhir periode observasi, t/hr