

ANALISIS KINERJA OPERASIONAL SUMUR PRODUKSI PANAS BUMI ZAS

Ziadul Akbar¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Diah Rosiani¹

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

²Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Szeged, 13 Dugonics Square, Szeged, 6270, Hungary

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

ABSTRAK

Pengaturan katup pada kepala sumur panas bumi berperan penting dalam mengontrol aliran dua fasa dan efisiensi produksi, namun penelitian tentang hubungan pengaturan katup dengan parameter operasional di Indonesia masih terbatas. Penelitian ini menganalisis pengaruh pengaturan *Master Valve*, *Wings Valve*, dan *Throttle Valve* terhadap tekanan kepala sumur (TKS), tekanan pipa dua fasa, dan temperatur pada Sumur ZAS di lapangan panas bumi Jawa Barat. Data dikumpulkan dari tanggal 13-21 September 2024 dengan pengukuran setiap jam yang meliputi posisi katup, tekanan, temperatur, level brine, dan pH fluida. Analisis menggunakan statistik deskriptif, koefisien korelasi Pearson, dan perbandingan performa pada berbagai pengaturan katup. Hasil menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara tekanan dan temperatur ($r = -0.74$), yang menunjukkan karakteristik aliran dua fasa yang dipengaruhi proses flashing. Pengaturan katup optimal adalah *Master Valve 100%*, *Wings Valve 80%*, dan *Throttle Valve 100%*, yang menghasilkan kestabilan terbaik dengan tekanan kepala sumur rata-rata 2.66 barg dan temperatur 123.6°C. Hasil ini dapat digunakan sebagai panduan operasional untuk meningkatkan keandalan operasi sumur panas bumi dan mengurangi risiko pembentukan kerak mineral.

Kata kunci: Panas bumi, Aliran dua fasa, Konfigurasi katup, Pengujian sumur, Korelasi Pearson

1. PENDAHULUAN

Energi panas bumi adalah salah satu sumber energi terbarukan utama di Indonesia dengan potensi yang sangat besar [1]. Indonesia memiliki cadangan panas bumi terbesar kedua di dunia setelah Amerika Serikat, dengan potensi mencapai 28.910 MW yang tersebar di berbagai wilayah [2]. Untuk memanfaatkan potensi ini secara maksimal, diperlukan sistem produksi yang efisien dan handal di berbagai lapangan panas bumi [3].

Salah satu komponen penting dalam sistem produksi sumur panas bumi adalah katup pada kepala sumur. Sistem katup ini berfungsi mengatur aliran fluida panas bumi dari dalam sumur menuju separator dan sistem pembangkit listrik [4]. Pada sumur panas bumi, fluida yang diproduksi umumnya berupa campuran uap dan air (aliran dua fasa) yang memerlukan pengaturan khusus agar dapat dimanfaatkan dengan baik [5]. Pengaturan katup yang tepat akan mempengaruhi keseimbangan antara uap dan air, yang berdampak pada efisiensi produksi energi [6].

Meskipun pengaturan katup sangat penting dalam operasi sumur panas bumi, penelitian yang membahas hubungan antara pengaturan katup dengan kinerja aliran dua fasa masih terbatas. Penelitian sebelumnya seperti Axelsson et al. [8] dan Barbier [9] lebih fokus pada utilisasi panas bumi dan teknologi pembangkit secara umum tanpa membahas detail pengaturan katup. Grant & Bixley [4] menjelaskan prinsip rekayasa reservoir namun tidak menganalisis optimasi katup berbasis data lapangan. Sementara itu, studi tentang pembentukan kerak oleh Sofyan et al. [10][11] sudah mengidentifikasi zona scaling, tetapi belum menghubungkannya

dengan strategi pengaturan katup. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan analisis korelasi [14][15] untuk mengoptimalkan pengaturan katup berdasarkan data lapangan aktual, dengan mempertimbangkan stabilitas tekanan-temperatur dan risiko scaling secara bersamaan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pengaturan *Master Valve*, *Wings Valve*, dan *Throttle Valve* terhadap parameter aliran dua fasa pada Sumur ZAS. Parameter yang diamati meliputi tekanan kepala sumur, tekanan pipa dua fasa, dan temperatur fluida produksi yang diukur setiap jam selama 9 hari (13-21 September 2024). Kebaruan penelitian ini ada tiga hal. Pertama, menggunakan analisis korelasi Pearson [14][15] untuk mencari hubungan kuantitatif antara pengaturan katup dengan stabilitas parameter operasional. Kedua, menggabungkan teori aliran dua fasa dari Horne [18] dengan data lapangan untuk menentukan konfigurasi katup yang paling optimal. Ketiga, menghubungkan pengaturan katup dengan risiko pembentukan kerak berdasarkan studi Sofyan et al. [10][11] dan Arnórsson et al. [17]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis untuk mengatur katup di lapangan, sehingga dapat meningkatkan stabilitas operasi, mengurangi risiko scaling [16], dan memperpanjang umur peralatan sesuai standar API [12]. Data dari penelitian ini juga bisa digunakan untuk mengembangkan sistem monitoring ke depannya [19].

Penelitian ini menggunakan metode pendekatan empirisnya yang mengandalkan data operasional harian hasil pengukuran langsung pengaturan ketiga katup utama di Sumur ZAS, lapangan panas bumi Jawa Barat. Analisis menggunakan statistik deskriptif dan korelasi Pearson mengungkap hubungan kuantitatif antara pengaturan katup dengan tekanan dan temperatur aliran dua fasa, serta penentuan konfigurasi pengaturan katup optimal yang mampu meningkatkan kestabilan operasi dan mengurangi risiko terbentuknya kerak mineral. Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi pada pemahaman teknis dan operasional, namun juga menjadi panduan praktis dalam pengelolaan sumur panas bumi di Indonesia yang dapat meningkatkan keandalan dan efisiensi produksi secara nyata.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pengaturan *Master Valve*, *Wings Valve*, dan *Throttle Valve* terhadap parameter aliran dua fasa pada Sumur ZAS di lapangan panas bumi Jawa Barat. Parameter yang diamati meliputi tekanan kepala sumur, tekanan pipa dua fasa, dan temperatur fluida produksi. Selain itu, penelitian ini juga mencari kondisi operasional optimal yang dapat mengurangi risiko pembentukan kerak mineral pada sistem *wellhead* dan perpipaan. Pembentukan kerak mineral adalah masalah umum dalam produksi panas bumi yang dapat mengurangi efisiensi produksi dan merusak peralatan, sehingga pemahaman mengenai kondisi operasional yang dapat mengurangi risiko ini sangat penting [10][11].

2. METODE

A. Deskripsi Sumur dan Pengumpulan Data

Sumur produksi ZAS adalah sumur panas bumi yang terletak di Jawa Barat dengan karakteristik aliran dua fasa (campuran uap dan air). Sumur ini dilengkapi dengan sistem pengaturan tiga katup utama yang terdiri dari *Master Valve*, *Wings Valve*, dan *Throttle Valve*. *Master Valve* berfungsi sebagai katup utama yang mengontrol total aliran dari sumur. *Wings Valve* mengatur pembagian aliran ke separator atau *flare line* dan berperan penting dalam mengontrol perbedaan tekanan antara *wellhead* dan separator. *Throttle Valve* mengatur tekanan di bagian hilir agar separator dapat bekerja dengan optimal [12].

B. Pengolahan dan Analisis Data

Data mentah dibersihkan dari nilai yang hilang dan data yang tidak normal. Beberapa data outlier yang teridentifikasi dihapus dari analisis untuk menjaga kualitas hasil. Data yang dihapus adalah data yang nilainya sangat menyimpang dari pola umum. Data dengan kesalahan pencatatan seperti nilai yang tertukar antar kolom juga dikoreksi atau dihapus. Proses validasi data dilakukan untuk memastikan semua pengukuran berada dalam rentang yang wajar dan sesuai dengan kondisi operasional sumur panas bumi.

Analisis data dilakukan menggunakan beberapa cara. Pertama, statistik deskriptif digunakan untuk memberikan gambaran keseluruhan tentang variabel operasi termasuk nilai rata-rata, standar deviasi, nilai minimum dan maksimum untuk setiap parameter yang diukur. Kedua, analisis korelasi Pearson digunakan untuk melihat hubungan antar variabel, terutama antara pengaturan katup dengan tekanan dan temperatur [14]. Koefisien korelasi Pearson (r) dihitung menggunakan rumus:

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

dimana x dan y adalah variabel yang dianalisis, $\bar{x}$ dan $\bar{y}$ adalah nilai rata-rata, dan n adalah jumlah data. Nilai r berkisar antara -1 hingga +1. Nilai mendekati +1 berarti kedua variabel bergerak searah (saat satu naik, yang lain juga naik), mendekati -1 berarti kedua variabel bergerak berlawanan arah (saat satu naik, yang lain turun), dan mendekati 0 berarti tidak ada hubungan yang jelas [15].

Selain itu, dilakukan perbandingan kinerja dengan membandingkan performa sumur berdasarkan berbagai pengaturan katup untuk mencari pengaturan yang menghasilkan performa terbaik dalam hal stabilitas dan efisiensi operasional. Parameter operasional yang dianalisis juga dievaluasi terhadap kondisi yang dapat memicu supersaturasi mineral dalam fluida panas bumi yang dapat menyebabkan pembentukan kerak [16].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Performa Operasional

Hasil analisis data operasional menunjukkan bahwa Sumur ZAS beroperasi dalam kondisi yang stabil dengan karakteristik aliran dua fasa yang baik. Tabel 1 menunjukkan ringkasan statistik untuk parameter operasional utama yang diamati selama periode pengujian setelah data outlier dihapus.

Hasil analisis menunjukkan bahwa ketika bukaan *Wings Valve* dinaikkan dari 80% ke 100%, tekanan rata-rata naik sebesar 0.43 barg (dari 2.66 ke 3.09 barg) dan temperatur rata-rata naik sekitar 3.0°C (dari 123.6°C ke 126.6°C). Hal ini terjadi karena ketika *Wings Valve* dibuka lebih lebar menjadi 100%, terjadi perubahan pada dinamika aliran di seluruh sistem perpipaan. Perubahan ini menciptakan kondisi hidrolik yang berbeda, dimana tekanan balik dari sistem hilir meningkat, dan pada saat yang sama, laju aliran total juga berubah [18].

Kenaikan tekanan dan temperatur secara bersamaan ini tidak bertentangan dengan korelasi negatif yang akan dibahas di bagian 3.3. Korelasi negatif menggambarkan hubungan alami antara tekanan dan temperatur pada variasi operasi normal, sedangkan perubahan akibat pengaturan katup merepresentasikan perubahan kondisi sistem secara keseluruhan yang mempengaruhi kedua parameter sekaligus melalui mekanisme yang berbeda.

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa *Master Valve* dibuka penuh (100%) dengan standar deviasi 0.0, artinya katup ini dibuka penuh secara konsisten sepanjang periode pengujian. *Wings Valve* diatur pada bukaan rata-rata 82.9% dengan standar deviasi 8.9%, yang berarti ada sedikit penyesuaian dalam pengoperasiannya untuk mengontrol aliran. Sebagian besar waktu *Wings*

Valve berada pada posisi 80%, namun ada beberapa periode dimana bukaan dinaikkan menjadi 100%. *Throttle Valve* menunjukkan variasi tertinggi dengan standar deviasi 24.1%, yang berarti katup ini paling sering disesuaikan untuk mengoptimalkan kondisi separator, dengan rentang bukaan dari 0% hingga 100%.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Data Operasi

Variabel	Mean	Std	Min	Max
Master Valve (%)	100.0	0.0	100	100
Wings Valve (%)	82.9	8.9	80	100
Throttle Valve (%)	89.2	24.1	0	100
TKS (barg)	2.66	0.63	2.03	4.67
Tekanan Pipa Dua Fasa (barg)	2.71	0.58	2.00	4.90
Temperatur Pipa Dua Fasa (°C)	123.6	4.04	119.4	136.6
pH Brine	5.97	0.08	6.00	6.00

Tekanan kepala sumur (TKS) rata-rata 2.66 barg dengan standar deviasi 0.63 barg menunjukkan operasi yang cukup stabil. Nilai standar deviasi yang tidak terlalu besar menunjukkan bahwa tekanan di kepala sumur tidak naik turun secara drastis, dengan rentang dari 2.03 hingga 4.67 barg. Temperatur pipa dua fasa rata-rata 123.6°C dengan standar deviasi 4.04°C juga menunjukkan konsistensi karakteristik panas dari fluida yang diproduksi, dengan rentang dari 119.4°C hingga 136.6°C. pH brine sangat stabil pada nilai rata-rata 5.97 dengan standar deviasi minimal 0.08, yang berarti sifat kimia fluida cenderung tetap selama periode pengamatan [9][17].

B. Pengaruh *Wings Valve* Terhadap Parameter Operasional

Wings Valve memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap karakteristik aliran. Tabel 2 menunjukkan perbandingan parameter operasional pada berbagai bukaan *Wings Valve*. Kenai-kan tekanan dan temperatur secara bersamaan ini tidak bertentangan dengan korelasi negatif yang akan dibahas di bagian 3.3. Korelasi negatif menggambarkan hubungan alami antara tekanan dan temperatur pada variasi operasi normal, sedangkan perubahan akibat pengaturan katup merepresentasikan perubahan kondisi sistem secara keseluruhan yang mempengaruhi kedua parameter sekaligus melalui mekanisme yang berbeda.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Berdasarkan Bukaan *Wings Valve*

Wings Valve (%)	N Data	TKS Rata-rata (barg)	Std TKS	Temp Rata-rata (°C)	Std Temp
80	157	2.66	0.63	123.6	4.04
100	19	3.09	0.53	126.6	4.14

Kenaikan tekanan dan temperatur secara bersamaan ini tidak bertentangan dengan korelasi negatif yang akan dibahas di bagian 3.3. Korelasi negatif menggambarkan hubungan alami antara tekanan dan temperatur pada variasi operasi normal, sedangkan perubahan akibat pengaturan katup merepresentasikan perubahan kondisi sistem secara keseluruhan yang mempengaruhi kedua parameter sekaligus melalui mekanisme yang berbeda.

Dari segi stabilitas operasi, bukaan *Wings Valve* 80% menunjukkan standar deviasi yang hampir sama dengan bukaan 100% (4.04°C vs 4.14°C), namun dengan jumlah data yang jauh lebih banyak (157 vs 19 data), konfigurasi 80% memberikan gambaran stabilitas yang lebih baik untuk operasi jangka panjang. Stabilitas temperatur ini penting untuk operasi separator yang efisien dan umur peralatan yang lebih panjang karena perubahan temperatur yang besar dapat mempercepat kerusakan material. Perubahan tekanan dan temperatur akibat pengaturan *Wings Valve* juga berpengaruh terhadap risiko pembentukan kerak, dimana perubahan yang terlalu besar dapat menciptakan kondisi yang memicu pengendapan mineral [10][11].

C. Hubungan Antara Temperatur dan Tekanan

Analisis korelasi Pearson antara parameter operasional menunjukkan hubungan yang penting untuk memahami karakteristik aliran dua fasa. Tabel 3 menunjukkan hasil analisis korelasi untuk variabel-variabel utama berdasarkan data keseluruhan dari semua konfigurasi katup

Tabel 3. Matriks Korelasi Pearson Antar Parameter

Parameter	TKS	Tekana Pipa Dua Fasa	Temperatur Pipa Dua Fasa
TKS	1.00	0.95	-0.74
Tekanan Pipa Dua Fasa	0.95	1.00	-0.71
Temperatur Pipa Dua Fasa	-0.74	-0.71	1.00

Terdapat hubungan negatif yang kuat antara temperatur pipa dua fasa dengan tekanan kepala sumur ($r = -0.74$) dan tekanan pipa dua fasa ($r = -0.71$). Hubungan negatif ini berarti ketika tekanan menurun, temperatur cenderung naik, dan sebaliknya. Fenomena ini menunjukkan karakteristik aliran dua fasa yang khas dalam sistem panas bumi. Hubungan yang berlawanan ini terjadi karena ketika tekanan menurun, lebih banyak air yang berubah menjadi uap melalui proses *flashing*, sehingga meningkatkan jumlah uap dan temperatur keseluruhan campuran [5][14].

Korelasi negatif ini mencerminkan hubungan dasar dalam sistem geothermal dua fasa. Pada tekanan yang lebih rendah, titik didih air menurun, menyebabkan lebih banyak fraksi cair mengalami penguapan spontan (*flashing*). Proses *flashing* ini melepaskan panas laten penguapan, yang berkontribusi pada peningkatan temperatur campuran uap-air. Sebaliknya, pada tekanan yang lebih tinggi, lebih sedikit *flashing* yang terjadi, sehingga fraksi uap berkurang dan temperatur campuran menurun.

Hubungan positif yang sangat kuat antara tekanan kepala sumur dengan tekanan pipa dua fasa ($r = 0.95$) menunjukkan bahwa kedua parameter ini bergerak secara bersamaan dengan sangat konsisten. Ini sesuai dengan teori bahwa tekanan di sepanjang sistem aliran menurun secara bertahap dari wellhead menuju separator. Korelasi yang sangat tinggi (0.95) menunjukkan bahwa perbedaan tekanan antara TKS dan tekanan pipa dua fasa relatif kecil dan konsisten, yang berarti penurunan tekanan di sepanjang jalur pipa tidak terlalu besar dan relatif stabil. Hal

ini menunjukkan desain sistem perpipaan sudah cukup efisien dengan gesekan dan hambatan aliran yang minimal.

Temuan ini bermanfaat untuk operasi di lapangan. Operator dapat menggunakan pemahaman tentang hubungan kuat antara tekanan dan temperatur untuk memprediksi kondisi temperatur berdasarkan pembacaan tekanan, atau sebaliknya. Hal ini berguna terutama jika salah satu sensor mengalami gangguan, dimana parameter lainnya dapat digunakan sebagai indikator kondisi operasional. Dari segi pencegahan pembentukan kerak, hubungan tekanan-temperatur yang kuat ini penting karena perubahan tekanan dapat mengubah keseimbangan fluida dan mempengaruhi kelarutan mineral dalam air [9][16].

D. Kondisi Operasi Optimal

Berdasarkan analisis terhadap berbagai pengaturan katup, kombinasi pengaturan katup yang memberikan kestabilan operasi terbaik adalah *Master Valve 100%*, *Wings Valve 80%*, dan *Throttle Valve 100%*. Tabel 4 menunjukkan parameter operasional pada kondisi optimal ini. Konfigurasi ini menghasilkan beberapa keuntungan dalam operasional. Pertama, stabilitas tekanan dengan standar deviasi TKS sebesar 0.63 barg menunjukkan bahwa tekanan terkontrol dengan baik dan operasi berjalan stabil. Tekanan yang stabil sangat penting untuk menjaga konsistensi produksi dan menghindari tekanan berlebih pada peralatan. Tekanan rata-rata 2.66 barg berada dalam rentang operasional yang baik, tidak terlalu tinggi yang dapat membebani peralatan, dan tidak terlalu rendah yang dapat mengurangi efisiensi produksi.

Tabel 4. Kondisi Operasi Optimal

Parameter	Nilai	Satuan
Master Valve	100	%
Wings Valve	80	%
Throttle Valve	100	%
Jumlah Data	157	-
TKS Rata-rata	2.66	barg
Std TKS	0.63	barg
Tekanan Pipa Dua Fasa Rata-rata	2.71	barg
Std Tekanan Pipa Dua Fasa	0.58	barg
Temperatur Pipa Dua Fasa Rata-rata	123.6	°C
Std Temperatur Pipa Dua Fasa	4.04	°C
pH Brine Rata-rata	5.97	-

Kedua, konsistensi temperatur dengan standar deviasi temperatur 4.04°C menunjukkan fluktuasi yang terkontrol dalam rentang yang dapat diterima untuk operasi jangka panjang. Temperatur rata-rata 123.6°C memberikan kondisi operasi yang konsisten untuk separator dan peralatan di bagian hilir. Konsistensi temperatur ini penting karena fluktuasi temperatur yang

besar dapat menyebabkan thermal stress pada material pipa dan peralatan, yang dapat mempercepat kegagalan material.

Ketiga, keseimbangan fase dengan temperatur 123.6°C pada tekanan 2.66 barg menghasilkan keseimbangan yang baik antara uap dan air dengan jumlah uap yang cukup untuk efisiensi turbin. Kondisi ini memungkinkan separator bekerja pada kondisi optimal untuk memisahkan fase uap dan cair dengan efisien. Jumlah data yang besar (157 pengamatan) juga memberikan kepercayaan yang tinggi bahwa konfigurasi ini dapat dipertahankan secara konsisten dalam operasi jangka panjang.

Stabilitas tekanan dan temperatur yang tinggi pada pengaturan ini juga mengurangi risiko pembentukan kerak. Perubahan kondisi yang minimal mengurangi kemungkinan terjadinya kondisi jenuh mineral yang dapat memicu pembentukan kerak. Pengaturan *Wings Valve 80%* dan *Throttle Valve 100%* menghasilkan aliran yang relatif lancar dengan hambatan minimal, menciptakan pola aliran yang lebih seragam dan mengurangi zona turbulensi yang dapat menjadi tempat terbentuknya kerak mineral. Selain itu, pH brine yang stabil pada 5.97 menunjukkan bahwa kondisi kimia fluida juga konsisten, yang penting untuk meminimalkan laju korosi dan pembentukan scale [10][11][16].

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pengaturan katup memiliki pengaruh yang besar terhadap karakteristik aliran dua fasa di Sumur ZAS. Analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan negatif yang kuat antara tekanan dan temperatur ($r = -0.74$), yang berarti ketika tekanan menurun, temperatur cenderung naik karena proses flashing yang mengubah lebih banyak air menjadi uap. Pengaturan katup optimal yang ditemukan adalah *Master Valve 100%*, *Wings Valve 80%*, dan *Throttle Valve 100%*, yang menghasilkan operasi paling stabil dengan tekanan kepala sumur rata-rata 2.66 barg dan temperatur 123.6°C.

Pengaturan optimal ini memberikan keseimbangan terbaik antara produktivitas, stabilitas operasi, efisiensi pemisahan uap dan air, serta pengurangan risiko pembentukan kerak. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan pengujian dengan desain eksperimen yang lebih terstruktur, pemantauan jangka panjang untuk melihat dampak terhadap umur peralatan, pengembangan model prediksi berbasis *machine learning*, serta studi lebih lanjut mengenai hubungan parameter operasional dengan *Scale Saturation Index* untuk strategi pencegahan kerak yang lebih efektif.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [2] Lund, J. W., & Toth, A. N. (2021). Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915.
- [3] Breede, K., Dzebisashvili, K., Liu, X., & Falcone, G. (2013). A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future. *Geothermal Energy*, 1(1), 4.
- [4] Grant, M. A., & Bixley, P. F. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering*, 2nd ed. Academic Press.
- [5] Zarrouk, S. J., & Moon, H. (2014). Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, 51, 142-153.
- [6] Sofyan, A., Bujang, Y. D. G., & Dewi, D. C. (2023). Analysis Of The Z Well Production Test Using The Horizontal Lip Pressure Method At Pt. Pertamina Geothermal Energy Ulubelu Area. *Indonesian Journal of Energy and Mineral*, 3(1), 40-55.
- [7] Sanyal, S. K., & Butler, S. J. (2005). An analysis of power generation prospects from enhanced geothermal systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, 29, 131-137.

- [8] Axelsson, G., Gunnlaugsson, E., Jonasson, T., & Olafsson, M. (2001). Low-temperature geothermal utilization in Iceland—Decades of experience. *Geothermics*, 30(2-3), 263-281.
- [9] Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1-2), 3-65.
- [10] Sofyan, A., Szanyi, J., & Hari, A. S. (2024). Investigation of Zone and Type of Scaling Based on the Fluid Flow Pattern in the Geothermal Well "X" at the Salak Geothermal Field-Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 14(1), 192-202.
- [11] Sofyan, A., Wiharti, S., Szanyi, J., Yudho Suranta, B., & Njeru, R. (2023). Determination of Scaling Zone and Scaling Type in Slotted Liner Based on the Fluid Flow Pattern in the Geothermal Well "X". *International Journal of Renewable Energy Research*, 13(1), 276-286.
- [12] API (2019). *Recommended Practice for Wellhead and Tree Equipment*, API RP 6A, 20th Edition. American Petroleum Institute.
- [13] New Zealand Standard (2015). *NZS 2403:2015 Code of Practice for Deep Geothermal Wells*. Standards New Zealand.
- [14] Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical Journal*, 24(3), 69-71.
- [15] Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Lawrence Erlbaum Associates.
- [16] Sofyan, A., Jaya, R., Susanto, H., Njeru, R. M., Bozsó, G., & Szanyi, J. (2025). Scale Treatment Planning Using Broaching Method in a Vapor-Dominated Geothermal Well X at Kamojang Geothermal Field. *Eng*, 6(4), 67.
- [17] Arnórsson, S., Stefánsson, A., & Bjarnason, J. Ö. (2007). Fluid-fluid interactions in geothermal systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65(1), 259-312.
- [18] Horne, R. N. (1995). *Steam/Water Flow in Geothermal Wells*. Department of Petroleum Engineering, Stanford University.
- [19] Sofyan, A., Aka, H. S., Rizaldy, A. M., & Suranta, B. Y. (2021, August). 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.
- [20] Sofyan, A., Bujang, Y. D. G., & Suranta, B. Y. (2023, May). Heat loss effect analysis by using JIWAFlow wellbore simulation in geothermal field Well-Y. In *3RD BOROBUDOR INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SCIENCE AND TECHNOLOGY 2021* (Vol. 2706, No. 1, p. 020116). AIP Publishing LLC.

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
n	=	Jumlah sampel (pasangan data)