ANALISIS LAJU ALIR, FRAKSI UAP, DAN ENTALPI *TRACER FLOW TEST* LAPANGAN MIZAN

Rafi Mizan Amar Fauzan[1], Akhmad Sofyan[1*], Henk Subekti[1]
[1]Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora 58315
*E-mail: akhmads@esdm.co.id

ABSTRAK

Pemantauan performa produksi sumur panas bumi sangat penting untuk menjaga keberlanjutan pasokan uap ke Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju alir massa, fraksi uap, dan entalpi fluida serta mengevaluasi kinerja pemisahan separator produksi dan unit *scrubber* di Lapangan Mizan menggunakan metode *Tracer Flow Test* (TFT). Pengujian dilakukan pada beberapa sumur produksi dan fasilitas permukaan di klaster MZN dan klaster RFZ dengan menginjeksikan perunut gas SF_6 untuk fasa uap dan *ThermoTrace* untuk fasa cair (*brine*). Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi terpadu antara laju alir massa sumur, karakteristik termodinamika klaster, efisiensi kinerja separator, dan suplai uap kering menuju fasilitas pembangkit berdasarkan data TFT aktual. Pendekatan ini memberikan interpretasi operasional yang lebih komprehensif dibandingkan dengan evaluasi TFT konvensional yang umumnya hanya berfokus pada estimasi laju alir massa sumur secara individual. Berdasarkan hasil pengukuran, lapangan ini menunjukkan variasi karakteristik termodinamika yang tegas antar klaster sumur. Sumur pada klaster RFZ menunjukkan karakteristik dominasi uap dengan fraksi uap melebihi 0,92 dan entalpi tinggi di atas 2650 kJ/kg, menghasilkan laju alir massa total hingga 19,8 kg/s (laju alir massa uap 18,6 kg/s). Sebaliknya, sumur pada klaster MZN menunjukkan karakteristik sistem dua fasa dengan fraksi uap yang lebih rendah berkisar antara 0,30 hingga 0,50 dan entalpi sekitar 1324–1712 kJ/kg. Analisis fasilitas permukaan mengonfirmasi keandalan Separator PS-6 dengan fraksi uap 0,934 dan unit *Scrubber* MZN dengan suplai uap kering rata-rata 40,1 kg/s. Hasil evaluasi ini menjadi landasan teknis dalam strategi manajemen reservoir guna memaksimalkan efisiensi ekstraksi energi.

Kata kunci: Entalpi fluida, Fraksi uap, Kinerja separator, Laju alir massa, Panas bumi, *Tracer Flow Test*

1. PENDAHULUAN

Peran kunci industri energi, khususnya panas bumi, sangat esensial dalam menjaga ketahanan energi nasional di tengah transisi energi global. Pada Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 40 Tahun 2025 Pasal 10, telah ditetapkan bahwa penyediaan energi primer Indonesia pada tahun 2030 ditargetkan mencapai antara 368 hingga 454 juta *tonnes of oil equivalent* (TOE) [1]. Untuk memenuhi target bauran energi primer tersebut, percepatan dan optimalisasi pemanfaatan panas bumi menjadi keharusan strategis [2]. Lapangan panas bumi yang beroperasi secara komersial, seperti sistem Karaha–Talaga Bodas, dituntut untuk terus menyuplai uap secara stabil dan efisien guna memutar turbin pembangkit listrik [3], [4]. Oleh karena itu, evaluasi performa sumur produksi dan fasilitas pemisahan uap secara berkelanjutan merupakan aspek krusial dalam operasional harian lapangan panas bumi.

Dalam praktiknya, karakteristik termodinamika sumur panas bumi seperti entalpi fluida, laju alir massa, dan fraksi uap akan mengalami dinamika serta penurunan seiring dengan berjalannya waktu produksi [5]. Salah satu tantangan utama dalam manajemen reservoir panas bumi adalah mengukur parameter-parameter aliran dua fasa tersebut secara akurat tanpa harus menghentikan operasi atau menutup sumur yang sedang berproduksi [6]. Pengukuran performa

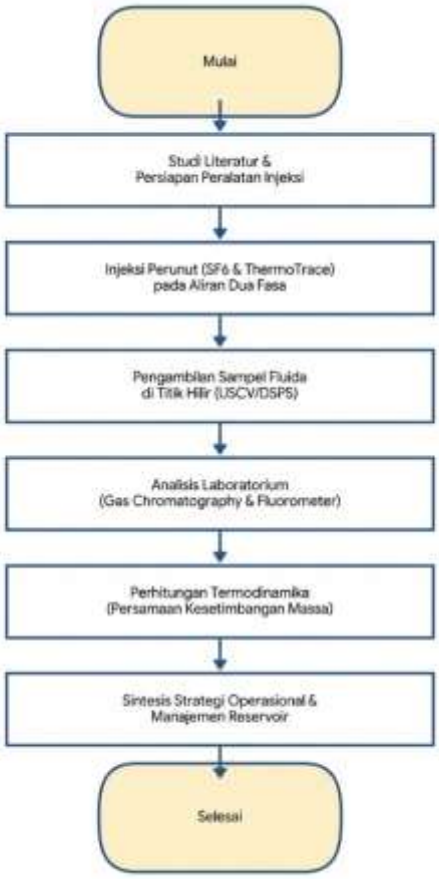
yang tidak presisi dapat menyebabkan kesalahan dalam perencanaan fasilitas permukaan maupun penentuan strategi intervensi sumur. Untuk menjawab tantangan teknis tersebut, metode *Tracer Flow Test* (TFT) diakui keandalannya dalam mengevaluasi kondisi terkini dari sumur-sumur produksi secara *real-time* berdampingan dengan metode uji produksi dan simulasi sumur lainnya [7], [8], [9].

Metode TFT telah diaplikasikan di Lapangan Mizan dengan menginjeksikan perunut kimia spesifik ke dalam aliran fluida dua fasa di fasilitas perpipaan [10]. Perunut berupa gas *Sulfur Hexafluoride* (SF_6) sangat efektif digunakan untuk melacak fasa uap pada temperatur tinggi [7], [11], sedangkan perunut cair (*liquid tracer*) berbasis senyawa sulfonat aromatik digunakan secara terpisah untuk mendeteksi pergerakan fasa *brine* [12]. Berdasarkan prinsip pengenceran massa (*mass dilution*), konsentrasi perunut yang terdeteksi pada titik sampel di hilir dapat digunakan untuk menghitung laju alir massa uap dan cairan secara presisi. Namun demikian, sebagian besar kajian *Tracer Flow Test* pada lapangan panas bumi masih berfokus pada estimasi laju alir massa sumur secara individual dan belum banyak mengintegrasikan hasil pengukuran TFT dengan evaluasi performa klaster, efisiensi fasilitas separator, serta implikasi operasional terhadap strategi manajemen reservoir [10]. Pada konteks Lapangan Mizan, ketersediaan data TFT aktual memberikan peluang untuk menilai perbedaan karakteristik termodinamika antarklaster secara lebih komprehensif. Oleh karena itu, masih terdapat celah penelitian (*research gap*) untuk menghubungkan variabel laju alir massa, fraksi uap, entalpi fluida, kinerja separator produksi, dan kapasitas suplai uap kering pada *scrubber* dalam satu kerangka evaluasi produksi terpadu.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis laju alir massa, fraksi uap, dan nilai entalpi fluida pada sumur-sumur produksi serta mengevaluasi kinerja pemisahan separator dan *scrubber* di Lapangan Mizan berdasarkan data TFT. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data *Tracer Flow Test* aktual dengan evaluasi termodinamika sumur, efisiensi pemisahan separator produksi, dan kestabilan suplai uap kering pada unit *scrubber* dalam satu kerangka analisis operasional terpadu. Berbeda dengan evaluasi TFT pada umumnya, penelitian ini membandingkan karakteristik dua klaster reservoir secara langsung serta menerjemahkan hasil perhitungan fraksi uap dan entalpi menjadi rekomendasi strategi produksi, mitigasi *liquid loading* dan *scaling*, serta prioritas intervensi sumur [13]. Sistematika penulisan disusun mulai dari pendahuluan, metode pelaksanaan lapangan, pembahasan kalkulasi performa sumur dan fasilitas permukaan, serta ditutup dengan simpulan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan desain observasi lapangan secara empiris dan kuantitatif melalui pelaksanaan *Tracer Flow Test* (TFT). Pemilihan metode ini didasarkan pada penelitian Hirtz dkk [7] yang membuktikan bahwa metode TFT memiliki tingkat presisi tinggi untuk pengukuran aliran dua fasa pada fasilitas produksi panas bumi. Dibandingkan dengan pengujian kapasitas produksi menggunakan metode *Horizontal Lip Pressure* konvensional seperti yang dikaji oleh Sofyan dkk. [8], metode TFT dipilih karena memungkinkan pengumpulan data laju alir dan entalpi secara *real-time* tanpa perlu mematikan sumur, membuang fluida ke *silencer*, atau mengganggu suplai uap ke pembangkit listrik. Pengambilan data lapangan dilakukan di Lapangan Mizan yang mencakup dua lokasi klaster utama, yaitu klaster MZN dan klaster RFZ, beserta fasilitas *Production Separator* (PS) dan *Scrubber*. Alur tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1, yang diawali dengan studi literatur dan persiapan peralatan injeksi, dilanjutkan dengan injeksi perunut ke dalam aliran dua fasa saat sumur berproduksi normal, pengambilan sampel fluida di hilir fasilitas, analisis konsentrasi perunut di laboratorium, hingga perhitungan termodinamika dan sintesis strategi operasional.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Peralatan utama yang digunakan dalam pengujian ini terdiri dari perangkat injeksi perunut presisi dan perangkat pengambilan sampel (*sampling port*) yang terpasang pada fasilitas perpipaan. Bahan perunut yang diaplikasikan terbagi menjadi dua jenis untuk mendeteksi masing-masing fasa fluida sesuai pedoman standar evaluasi sumur panas bumi [7], [10]. Untuk melacak fasa uap, digunakan gas perunut *Sulfur Hexafluoride* (SF_6) dengan konsentrasi 5,15% yang diinjeksikan secara terukur menggunakan *Mass Flow Controller* dalam satuan *standard cubic centimeters per minute* (sccm) [7], [11]. Sementara itu, untuk melacak fasa cair (*brine*), digunakan perunut cair *ThermoTrace* dengan variasi konsentrasi 0,1%, 0,7%, dan 1,0% yang diinjeksikan menggunakan pompa presisi tinggi dalam satuan gram per menit (g/min). Penggunaan perunut cair tahan temperatur tinggi ini mengacu pada karakteristik kestabilan termal perunut fasa cair pada sistem hidrotermal yang dievaluasi oleh Sajkowski dkk [12].

Metode pengumpulan data diawali dengan menginjeksikan kedua perunut secara kontinu ke dalam aliran perpipaan dua fasa. Setelah fluida melewati jarak pencampuran yang memadai guna mencapai waktu tinggal (*residence time*) dan homogenitas aliran, pengambilan sampel fluida dilakukan di titik hilir seperti *Upstream Control Valve* (USCV) dan *Downstream Production Separator* (DSPS). Proses pengambilan sampel fasa uap dan fasa cair dipisahkan menggunakan *mini-separator* portabel, dengan pencatatan periodik pada interval waktu 4 hingga 6 menit untuk setiap objek uji. Sebagai variabel kendali (*control variable*), bukaan katup produksi (*Control Valve*) dijaga tetap konstan guna memastikan tekanan kepala sumur (WHP) stabil dan aliran berada pada kondisi tunak (*steady-state*). Sampel selanjutnya dianalisis di laboratorium menggunakan instrumen *Gas Chromatography* dan *Fluorometer* untuk menentukan konsentrasi SF_6 dalam satuan *parts per million* (ppm) serta konsentrasi *ThermoTrace* dalam satuan *parts per billion* (ppb).

Perhitungan laju alir massa masing-masing fasa dan entalpi fluida didasarkan pada prinsip kesetimbangan massa pengenceran perunut (*tracer dilution mass balance*) sebagaimana dirumuskan oleh Hirtz dkk [7] dan Lovelock [11]. Persamaan matematis untuk menghitung laju alir massa fasa uap (Q_{uap}) disajikan pada Pers. (1):

$$Q_{\text{uap}} = \frac{I_{\text{SF6}}}{C_{\text{SF6}}} \times K_1 \tag{1}$$

sedangkan laju alir massa fasa cair atau *brine* (Q_{air}) dihitung menggunakan Pers. (2):

$$Q_{\text{air}} = \frac{I_{\text{TT}}}{C_{\text{TT}}} \times K_2 \tag{2}$$

Selanjutnya, fraksi uap (x) dan entalpi total campuran dua fasa (H_{total}) dievaluasi berdasarkan properti termodinamika uap dan cairan jenuh pada tekanan saturasi menggunakan Pers. (3) dan Pers. (4):

$$x = \frac{Q_{\text{uap}}}{Q_{\text{uap}} + Q_{\text{air}}} \tag{3}$$

dan

$$H_{\text{total}} = x \cdot H_{\text{uap}} + (1 - x) \cdot H_{\text{air}} \tag{4}$$

Dalam persamaan di atas, I_{SF6} adalah laju injeksi gas perunut SF_6 (sccm), C_{SF6} adalah konsentrasi SF_6 terukur di sampel uap hilir (ppm), I_{TT} adalah laju injeksi perunut cair *ThermoTrace* (g/min), C_{TT} adalah konsentrasi *ThermoTrace* terukur di sampel *brine* hilir (ppb), serta K_1 dan K_2 merupakan konstanta konversi satuan masing-masing fasa. Adapun H_{uap} dan H_{air} menyatakan entalpi spesifik fasa uap jenuh dan cairan jenuh pada tekanan saturasi pengujian (kJ/kg). Tabel 1 menjabarkan jadwal pelaksanaan pengujian lapangan beserta rincian obyek dan titik pengambilan sampel di Lapangan Mizan.

Tabel 1. Jadwal dan Lokasi Pelaksanaan TFT di Lapangan Mizan

Tanggal Uji	Obyek Penelitian	Jenis Perunut Cair	Titik Sampling
25 Juni 2024	Separator PS-5	1,0% *ThermoTrace*	2"TP DSPS & 0.5"SP DSPS
25 Juni 2024	Sumur MZN-5.1	1,0% *ThermoTrace*	1.5"TP USCV & 1.5"BP USCV
26 Juni 2024	Sumur MZN-4.1	1,0% *ThermoTrace*	1.5"TP USCV & 1.5"BP USCV
27 Juni 2024	Sumur RFZ-3.4	0,1% *ThermoTrace*	1.5"SP USCV & 1.5"BP USCV
27 Juni 2024	Sumur RFZ-3.1	0,1% *ThermoTrace*	1.5"TP USCV & 1.5"BP USCV
28 Juni 2024	Separator PS-6	0,7% *ThermoTrace*	2"TP DSPS & 1"SP DSPS

3. PEMBAHASAN

A. Analisis Laju Alir Massa dan Karakteristik Sumur

Pengujian fluida dua fasa menggunakan metode *Tracer Flow Test* (TFT) di Lapangan Mizan memberikan gambaran komprehensif mengenai performa tiap sumur dalam menyuplai uap ke fasilitas permukaan. Berdasarkan kalkulasi pengenceran perunut, laju alir massa total dari sumur-sumur yang diuji menunjukkan variasi kapasitas produksi yang signifikan antara klaster MZN dan klaster RFZ. Sumur RFZ-3.1 tercatat sebagai produsen fluida terbesar di klaster RFZ dengan laju alir massa total mencapai 19,8 kg/s pada tekanan kepala sumur (WHP) 16,1 barg.

Laju alir ini jauh melampaui sumur lainnya di klaster yang sama, yaitu RFZ-3.4 (10,3 kg/s), RFZ-3.3 (5,83 kg/s), dan RFZ-3.2 (2,41 kg/s).

Sementara itu, pada klaster MZN, sumur MZN-4.1 dan MZN-5.1 menunjukkan kapasitas laju alir massa total yang cukup berimbang, masing-masing sebesar 12,3 kg/s dan 11,9 kg/s. Namun, terdapat perbedaan mendasar terkait proporsi fasa yang diproduksi oleh kedua klaster tersebut. Seluruh sumur di klaster RFZ memproduksi fluida dengan fraksi uap (*steam fraction*) yang sangat dominan, yakni berada di atas 0,92 pada kondisi rata-rata tekanan kepala sumur 15–19,5 barg. Sebagai perbandingan, sumur di klaster MZN memiliki fraksi uap uji yang jauh lebih rendah, yaitu 0,493 pada sumur MZN-4.1 dan 0,298 pada sumur MZN-5.1. Data perbandingan parameter termodinamika sumur secara terperinci disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Termodinamika Sumur Produksi Lapangan Mizan

Nama Sumur	Tekanan Kepala Sumur (barg)	Laju Alir Total (kg/s)	Entalpi Uji (kJ/kg)	Fraksi Uap (Uji)
MZN-5.1	6,7–6,9	11,9	1324	0,298
MZN-4.1	6,0	12,3	1712	0,493
RFZ-3.1	16,1	19,8	2654	0,927
RFZ-3.2	15,08–15,11	2,41	2671	0,937
RFZ-3.3	15,2	5,83	2714	0,959
RFZ-3.4	19,5	10,3	2676	0,939

B. Evaluasi Entalpi dan Karakteristik Termodinamika Reservoir

Variasi nilai fraksi uap antara klaster MZN dan RFZ berkorelasi linier dengan kandungan entalpi fluida dari reservoir di masing-masing area. Sumur-sumur di klaster RFZ memiliki nilai entalpi campuran uji yang tergolong sangat tinggi, berada pada rentang 2654 kJ/kg hingga mencapai 2714 kJ/kg pada sumur RFZ-3.3. Pada kondisi pengujian, temperatur entalpi tercatat melampaui kurva saturasi (*out of range*) yang menandakan fluida berada pada fasa uap kering (*dry steam*) atau uap panas lanjut (*superheated steam*). Karakteristik termodinamika ini sangat menguntungkan dari segi efisiensi ekstraksi energi, karena fluida dapat diproses dengan tahap pemisahan cairan yang minimal dan memiliki kualitas uap yang ideal untuk meminimalkan erosi maupun kerusakan sudu-sudu turbin.

Sebaliknya, sumur-sumur di klaster MZN mencerminkan sistem reservoir dominasi cairan (*liquid-dominated system*) dua fasa. Sumur MZN-4.1 menghasilkan entalpi uji sebesar 1712 kJ/kg dengan temperatur entalpi terekam pada 355 °C, sedangkan sumur MZN-5.1 memiliki entalpi yang lebih rendah yaitu 1324 kJ/kg dengan temperatur entalpi 296 °C. Entalpi yang lebih rendah pada klaster MZN ini menandakan besarnya proporsi fasa cair yang terbawa dari zona *feedzone* menuju permukaan. Penurunan entalpi lebih lanjut pada sumur MZN-5.1 harus menjadi titik perhatian bagi insinyur produksi (*production engineer*), sebab penurunan entalpi dan tekanan kepala sumur dapat memicu kejenuhan berlebih (*supersaturation*) serta pembentukan endapan (*scaling*) silika maupun kalsit di sepanjang *slotted liner* dan lubang sumur [14], [15], [16]. Rangkuman karakteristik entalpi dan fraksi uap terkoreksi pada tiap sumur uji disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Entalpi dan Fraksi Uap Terkoreksi Sumur Uji

Nama Sumur	Entalpi Rata-rata Uji (kJ/kg)	Fraksi Uap Terkoreksi	Karakteristik Fluida
RFZ-3.3	2714	0,969	Dominasi Uap
RFZ-3.4	2676	0,950	Dominasi Uap
RFZ-3.2	2671	0,948	Dominasi Uap
RFZ-3.1	2654	0,939	Dominasi Uap
MZN-4.1	1712	0,493	Dua Fasa
MZN-5.1	1324	0,306	Dua Fasa

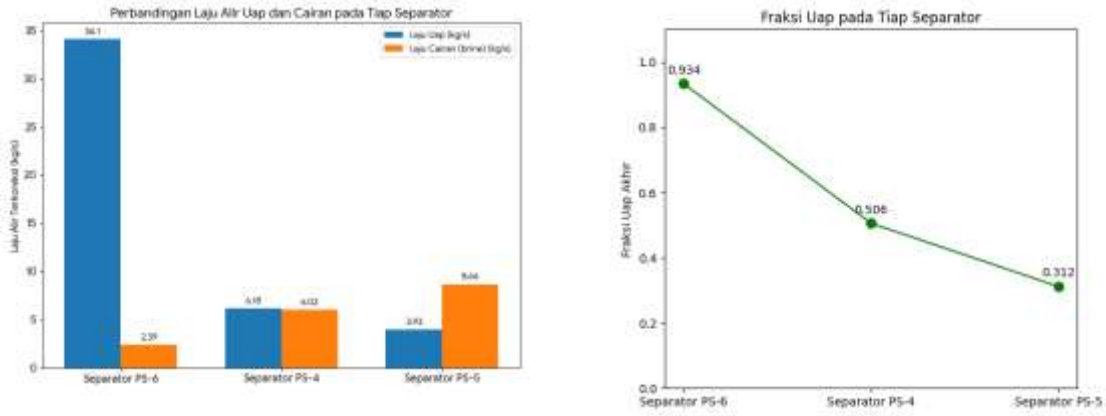
C. Kinerja Fasilitas Separator Produksi

Tingginya produksi fasa cairan (*brine*) dari klaster MZN menuntut keandalan tinggi pada fasilitas separator produksi (PS) di permukaan [17]. Kinerja separator dievaluasi dari efisiensi pemisahan antara laju alir uap murni dan *brine* yang terbuang (*discharge*). Hasil uji perunut pada Separator PS-4 yang beroperasi pada tekanan rata-rata 5,73 barg (temperatur saturasi 162,6 °C) menunjukkan laju alir total 12,20 kg/s dengan rasio pemisahan yang berimbang, yakni 6,18 kg/s uap terkoreksi dan 6,02 kg/s *brine* (fraksi uap 0,506). Kondisi ini menggambarkan kemampuan PS-4 dalam mengelola sumur-sumur dengan fraksi uap menengah. Sementara itu, Separator PS-5 beroperasi pada beban fluida cair yang lebih tinggi, memproses total 12,59 kg/s fluida dengan rincian 3,93 kg/s uap terkoreksi dan dominasi *brine* mencapai 8,66 kg/s (fraksi uap 0,312) pada tekanan operasi rata-rata 5,07 barg.

Berbeda dengan PS-4 dan PS-5, Separator PS-6 memproses suplai uap bervolume masif dengan karakteristik fluida yang jauh lebih kering, selaras dengan karakteristik sumur-sumur klaster RFZ yang menyuplainya. Pengujian pada PS-6 mengonfirmasi total aliran fluida sebesar 36,49 kg/s pada tekanan saturasi 8,51–8,60 barg, dengan luaran uap terkoreksi dominan sebesar 34,10 kg/s dan buangan *brine* hanya sebesar 2,39 kg/s. Keberhasilan PS-6 dalam memisahkan uap berkapasitas tinggi ini menunjukkan bahwa fasilitas tersebut bertindak sebagai jalur penyaluran uap utama (*main steam line*) di area pengujian dengan fraksi uap akhir mencapai 0,934. Data evaluasi kinerja pemisahan pada masing-masing separator disajikan secara terperinci pada Tabel 4 dan divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 4. Evaluasi Kinerja Pemisahan Separator Produksi

Unit Separator	Tekanan Operasi (barg)	Laju Uap Terkoreksi (kg/s)	Laju Brine Terkoreksi (kg/s)	Laju Alir Total (kg/s)	Fraksi Uap Akhir
Separator PS-6	8,51–8,60	34,10	2,39	36,49	0,934
Separator PS-4	5,73	6,18	6,02	12,20	0,506
Separator PS-5	5,07	3,93	8,66	12,59	0,312



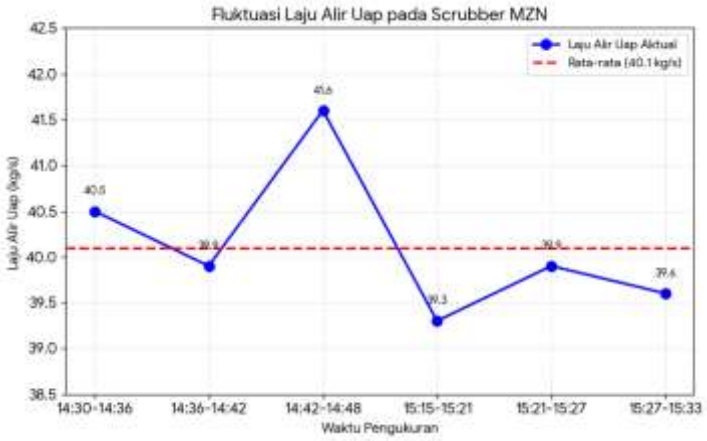
(a) Perbandingan Laju Alir Uap dan Cairan (b) Fraksi Uap pada Tiap Separator

Gambar 2. Grafik Kinerja Pemisahan Separator Produksi dan Fraksi Uap pada Tiap Separator

D. Evaluasi Scrubber dan Suplai Uap Kering (Dry Steam)

Unit *Scrubber* berperan sebagai gerbang perlindungan terakhir (*final defense*) dalam sistem fasilitas permukaan guna mengeliminasi sisa kelembapan (*moisture content*) dan partikel pengotor bawaan sebelum uap dialirkan menuju turbin pembangkit [17]. Berdasarkan hasil pengujian TFT pada *Scrubber* MZN, terdeteksi laju aliran uap kering yang sangat stabil dengan nilai rata-rata 40,1 kg/s (rentang 39,3–41,6 kg/s) pada tekanan operasi 5,80 barg dan temperatur saturasi 163,0 °C. Volume uap yang melewati fasilitas ini merupakan akumulasi dari hasil pemisahan berbagai separator produksi di area tersebut.

Laju aliran rata-rata sebesar 40,1 kg/s ini mencerminkan kapasitas nominal uap (*steam yield*) yang andal untuk menggerakkan pembangkit pada kapasitas megawatt (MW) yang ditargetkan. Namun, pemantauan laju alir uap pada *scrubber* juga menjadi dasar penting untuk mengevaluasi kehilangan tekanan (*pressure drop*) di sepanjang jaringan perpipaan pengumpul uap (*steam gathering system*). Fluktuasi laju alir akibat perilaku transien dari sumur-sumur yang menyuplainya—khususnya dari sumur dua fasa di klaster MZN—perlu dikendalikan menggunakan sistem instrumentasi katup hulu agar kualitas uap murni yang keluar dari *Scrubber* MZN menuju turbin tetap memenuhi spesifikasi termodinamika secara ketat. Profil fluktuasi laju alir uap hasil pemantauan interval waktu pada unit *Scrubber* MZN ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Fluktuasi Laju Alir Uap Aktual pada Unit Scrubber MZN

E. Sintesis dan Implikasi Operasional

Berdasarkan metodologi pengenceran perunut termal (*tracer dilution*), sintesis perhitungan laju alir massa dan entalpi memvalidasi karakteristik fluida dari masing-masing klaster sumur [10]. Sebagai contoh penerapan Pers. (1) dan Pers. (2) pada sumur MZN-4.1, konsentrasi perunut yang terdeteksi di hilir menghasilkan kalkulasi laju alir uap terkoreksi (Q_{uap}) sebesar 6,05 kg/s dan laju alir cairan terkoreksi (Q_{air}) sebesar 6,21 kg/s pada tekanan 5,9 barg [10]. Dengan mensubstitusikan kedua nilai laju alir tersebut ke dalam Pers. (3), diperoleh nilai fraksi uap (x) aktual sebesar 0,493 [10]. Selanjutnya, parameter fraksi uap ini diintegrasikan dengan entalpi spesifik uap (H_{uap}) dan cairan (H_{air}) pada kondisi saturasi menggunakan Pers. (4), sehingga tervalidasi nilai entalpi total campuran uji (H_{total}) untuk sumur MZN-4.1 berada pada angka 1712 kJ/kg [10]. Proses sintesis kalkulasi ini membuktikan bahwa pengukuran dua fasa secara *online* tanpa mematikan sumur memberikan akurasi data yang sangat representatif terhadap kondisi operasional aktual di lapangan [7].

Implikasi operasional dari hasil sintesis ini memetakan dua strategi pengelolaan reservoir yang berbeda [13]. Pada klaster RFZ, kalkulasi Pers. (3) secara konsisten menghasilkan fraksi uap terkoreksi di atas 0,93 [10]. Temuan ini memberikan justifikasi teknis bahwa sumur-sumur RFZ sangat layak difungsikan sebagai penopang utama (*baseload*) pasokan uap kering ke pembangkit, dengan pengaturan bukaan katup produksi yang dapat dimaksimalkan tanpa risiko *liquid loading* yang berarti, sembari tetap melakukan pemantauan potensi *scaling* pada sistem dominasi uap [13], [18].

Sebaliknya, tingginya laju produksi *brine* di klaster MZN menuntut perhatian khusus dalam perancangan strategi perawatan dan intervensi sumur [5], [19]. Tingginya fraksi cairan berpotensi mempercepat fenomena korosi dan pembentukan endapan (*scaling*) silika pada fasilitas perpipaan maupun lubang sumur, serta membebani kapasitas pemisahan pada separator produksi PS-4 dan PS-5 [14], [15], [16]. Sebagai langkah mitigasi yang komprehensif pada tahap *workover*, insinyur produksi dapat merancang program pembersihan kerak terarah serta penutupan zona air (*water shut-off*) guna menekan laju produksi *brine* yang berlebihan dari formasi [13], [19]. Melalui intervensi tersebut, profil produksi sumur klaster MZN diharapkan dapat kembali optimal dengan fraksi uap yang lebih tinggi dan entalpi campuran yang meningkat.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis laju alir massa, fraksi uap, dan entalpi fluida serta evaluasi kinerja separator menggunakan data *Tracer Flow Test* (TFT) di Lapangan Mizan, disimpulkan bahwa terdapat perbedaan karakteristik termodinamika reservoir yang tegas antara klaster RFZ dan klaster MZN. Klaster RFZ terkonfirmasi sebagai sistem dominasi uap (*vapor-dominated system*) dengan performa produksi uap yang superior, ditandai oleh laju alir massa total mencapai 2,41–19,8 kg/s, nilai entalpi tinggi pada rentang 2654–2714 kJ/kg, serta fraksi uap terkoreksi mencapai 0,939–0,969. Sebaliknya, sumur-sumur pada klaster MZN menunjukkan karakteristik sistem dua fasa dominasi cairan (*liquid-dominated system*) dengan laju alir massa total 11,9–12,3 kg/s, rentang entalpi yang lebih rendah antara 1324 kJ/kg hingga 1712 kJ/kg, serta fraksi uap terkoreksi berkisar antara 0,306 hingga 0,493. Pada fasilitas permukaan, Separator PS-6 menunjukkan efisiensi pemisahan tertinggi dengan luaran uap 34,10 kg/s (fraksi uap akhir 0,934) dibandingkan Separator PS-4 (0,506) dan PS-5 (0,312), sedangkan unit *Scrubber* MZN mampu menjaga kestabilan suplai uap kering menuju turbin pada rata-rata 40,1 kg/s.

Perbedaan karakteristik termodinamika ini menuntut penerapan strategi manajemen reservoir yang dibedakan untuk masing-masing klaster. Sumur pada klaster RFZ direkomendasikan untuk dioptimalkan sebagai penopang pasokan beban dasar (*baseload*) uap kering menuju fasilitas pembangkit. Sementara itu, tingginya laju alir *brine* pada klaster MZN memerlukan pengendalian bukaan katup hulu serta mitigasi proaktif terhadap risiko *liquid loading* dan *scaling*

silika melalui program pemeliharaan sumur dan *workover* terarah guna menjaga keberlanjutan suplai uap pembangkit.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] Pemerintah Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 40 Tahun 2025 tentang Kebijakan Energi Nasional*, Jakarta: Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2025.

[2] N. A. Pambudi and D. K. Ulfa, "The geothermal energy landscape in Indonesia: A comprehensive 2023 update on power generation, policies, risks, phase and the role of education," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 114008, Jan. 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114008.

[3] T. W. Prabata, H. B. Pratama, and T. Sutopo, "The development study of Karaha–Talaga Bodas geothermal field using numerical simulation," *Geothermal Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 1–22, Aug. 2019, doi: https://doi.org/10.1186/s40517-019-0139-2.

[4] 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," dalam *Proceedings of the 2nd Borobudur International Symposium on Science and Technology (BIS-STE 2020)*, Aug. 2021, pp. 72–82, doi: https://doi.org/10.2991/aer.k.210810.013.

[5] H. B. Pratama and N. M. Saptadji, "Study of Production-Injection Strategies for Sustainable Production in Geothermal Reservoir Two-Phase by Numerical Simulation," *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 8, no. 1, pp. 25–38, Apr. 2021, doi: https://doi.org/10.17014/ijog.8.1.25-38.

[6] M. H. Mubarok, S. J. Zarrouk, and J. E. Cater, "Two-phase flow measurement of geothermal fluid using orifice plate: Field testing and CFD validation," *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 927–946, Apr. 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.081.

[7] P. Hirtz, R. Kunzman, M. Broaddus, and J. Barbitta, "Developments in tracer flow testing for geothermal production engineering," *Geothermics*, vol. 30, no. 6, pp. 727–745, Dec. 2001, doi: https://doi.org/10.1016/S0375-6505(01)00023-2.

[8] 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 Journal of Energy and Mineral*, vol. 3, no. 1, pp. 40–55, May 2023, doi: https://doi.org/10.53026/IJoEM/2023/3.1/1038.

[9] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, and B. Y. Suranta, "Heat loss effect analysis by using JIWAFlow wellbore simulation in geothermal field Well-Y," dalam *AIP Conference Proceedings*, vol. 2706, no. 1, May 2023, p. 020116, doi: https://doi.org/10.1063/5.0120544.

[10] Thermochem Indonesia, "*Pertamina Geothermal Energy Final Tracer Flow Test (TFT) Field Evaluation Report*," Thermochem Technical Report, Rep. TFT-24, Jun. 2024.

[11] B. G. Lovelock, "Steam flow measurement using alcohol tracers," *Geothermics*, vol. 30, no. 6, pp. 641–654, Dec. 2001, doi: https://doi.org/10.1016/S0375-6505(01)00020-7.

[12] L. Sajkowski, T. M. Seward, B. Mountain, and L. Marynowski, "The stability of polyaromatic naphthalene sulfonates in hydrothermal solutions to 330 °C at equilibrium saturated vapour pressure," *Geothermics*, vol. 104, p. 102437, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102437.

[13] F. S. Tut Haklidir and M. Haklidir, "The importance of long-term well management in geothermal power systems using fuzzy control: A Western Anatolia (Turkey) case study," *Energy*, vol. 213, p. 118817, Dec. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118817.

[14] 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 Journal of Energy and Mineral*, vol. 1, no. 1, pp. 26–33, 2021, doi: https://doi.org/10.53026/IJoEM/2021/1.1/15.

[15] A. Sofyan, J. Szanyi, and H. S. Aka, "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*, vol. 14, no. 1, pp. 192–202, 2024, doi: https://doi.org/10.20508/ijrer.v14i4.14417.g8946.

[16] A. Sofyan, S. Wiharti, J. Szanyi, B. Y. 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'," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 13, no. 1, pp. 276–286, 2023, doi: https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i1.13603.g8681.

[17] 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'," dalam *Der Digital German Geothermie Kongress 2020*, Nov. 2020, pp. 1–15.

[18] 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, Apr. 2025, doi: https://doi.org/10.3390/eng6040067.

[19] A. Sofyan, "*Scale formation and treatment plan in Indonesian geothermal wells*," Ph.D. dissertation, Dept. of Geology, University of Szeged, Szeged, Hungary, 2025, doi: https://doi.org/10.14232/phd.12872.

Daftar Simbol

Q_{uap}	=	Laju alir massa fasa uap, kg/s
Q_{air}	=	Laju alir massa fasa cairan (brine), kg/s
I_{SF6}	=	Laju injeksi perunut gas Sulfur Hexafluoride (SF6), sccm
C_{SF6}	=	Konsentrasi perunut SF6 terukur pada sampel uap di hilir, ppm
I_{TT}	=	Laju injeksi perunut cair ThermoTrace, g/min
C_{TT}	=	Konsentrasi perunut ThermoTrace terukur pada sampel brine di hilir, ppb
K_1, K_2	=	Konstanta faktor konversi satuan laju alir fasa uap dan fasa cair
x	=	Fraksi kering uap (steam dryness fraction), tanpa satuan
H_{total}	=	Entalpi fluida total campuran dua fasa, kJ/kg
H_{uap}	=	Entalpi spesifik uap jenuh pada kondisi saturasi, kJ/kg
H_{air}	=	Entalpi spesifik cairan jenuh pada kondisi saturasi, kJ/kg