

ANALISIS DINAMIKA GEOKIMIA BRINE DAN DAMPAKNYA PADA PROGRAM STIMULASI SUMUR

Tetuka Arya Wijasena¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Henk Subekti¹

¹Teknik Produksi Migas, 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, Szeged, 6270

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

ABSTRAK

Kualitas data geokimia fluida panas bumi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional permukaan dan konfigurasi fasilitas pemisahan. Penelitian ini menganalisis dinamika parameter geokimia brine selama program stimulasi Sumur X pada periode Agustus 2024 untuk mengevaluasi pengaruh modus operasi terhadap kualitas data dan implikasinya pada operasional. Data meliputi pengukuran time-series pH, EC, TDS, TSS, Cl, Mg, dan Fe dari empat titik sampling (*Downstream Separator S-1, Two-Phase Line Mini Separator, Two-Phase Line Bottom Port, dan Discharge AFT*) dengan variasi *wellhead pressure* (WHP) 8.97-26.15 barg dan status operasi online maupun bleeding 7-12 putaran. Hasil menunjukkan bahwa modus bleeding menyebabkan peningkatan TSS hingga 4,676 ppm di Discharge AFT dengan indikasi passing dari dumping line, sementara kondisi online di S-1 menghasilkan TSS lebih rendah (rata-rata $1,754 \pm 1,205$ ppm) dan Cl lebih stabil (rata-rata $18,875 \pm 1,590$ ppm). Perbedaan signifikan antara Mini Separator dan Bottom Port pada waktu bersamaan mengindikasikan fraksinasi fase dengan Bottom Port menunjukkan TDS 48,034 ppm dibanding 10,708 ppm pada Mini Separator. Analisis korelasi menunjukkan WHP tidak berkorelasi kuat dengan TSS ($R^2=0.18$), mengindikasikan konfigurasi valve dan isolasi *dumping line* lebih dominan. Analisis duplikasi Mg menunjukkan deviasi hingga 187.8%, menekankan kebutuhan *quality control* ketat. Nilai Mg umumnya rendah (0.30-11.10 ppm) konsisten dengan *fluida geothermal mature*. Temuan utama penelitian ini adalah: (1) *bleeding* meningkatkan TSS 52.9% dan Cl 33.5% akibat passing dumping line, (2) titik sampling menentukan representasi data dengan perbedaan TDS hingga 348% antara Mini Separator dan *Bottom Port*, (3) variabilitas Mg tinggi memerlukan *filtrasi on-site* dan triplikasi analisis. Strategi perbaikan meliputi implementasi SOP sampling dengan stabilisasi kondisi operasi 15-30 menit sebelum pengambilan sampel, filtrasi on-site 0.45 μ m, pencatatan sistematis parameter operasional, dan pelengkapan analisis temperatur serta SiO₂ untuk evaluasi scaling yang lebih komprehensif.

Kata kunci: geokimia brine, operasi *bleeding*, separator, TSS, *quality control*

1. PENDAHULUAN

Pengelolaan kimia fluida *geothermal* merupakan aspek kritis dalam operasional pembangkit listrik tenaga panas bumi karena berpengaruh langsung terhadap produktivitas sumur, umur fasilitas, dan efisiensi pembangkitan. Fluida *geothermal* mengandung konsentrasi mineral terlarut yang tinggi sehingga dapat menyebabkan *scaling* dan korosi pada sistem produksi [1]. Karakterisasi geokimia yang akurat menjadi landasan penting untuk mendiagnosis kondisi *reservoir*, mengevaluasi risiko *scaling*, dan mengembangkan strategi mitigasi yang efektif [2].

Dalam sistem produksi *geothermal*, fluida mengalami perubahan kondisi fisiko-kimia saat mengalir dari *reservoir* menuju permukaan akibat penurunan tekanan dan temperatur. Proses *flashing* (pemisahan fase uap-cair) menghasilkan fase uap dan fase cair dengan komposisi kimia yang berbeda [3]. Konfigurasi fasilitas pemisahan, tekanan operasi, dan aktivitas *bleeding*

(pembuangan) dapat memengaruhi kualitas sampel yang diambil sehingga data geokimia yang diperoleh tidak selalu merepresentasikan kondisi aktual reservoir [4].

Penelitian terdahulu mengenai geokimia *fluida geothermal* dan pengaruh operasional terhadap kualitas data telah dilakukan oleh beberapa peneliti [4]. Mengidentifikasi parameter hidrokimia dan operasional yang mendorong kinetika *scaling* karbonat pada fasilitas geothermal, menunjukkan bahwa pH, temperatur, dan konsentrasi ion sangat berpengaruh terhadap pembentukan *scale*. Namun penelitian tersebut dilakukan pada kondisi *operasi steady-state* tanpa mengevaluasi dinamika saat *transient operation* seperti *bleeding* [5]. Menginvestigasi zona dan tipe *scaling* berdasarkan pola aliran fluida dalam sumur *geothermal* menggunakan *wellbore simulation*, menemukan bahwa distribusi *scaling* sangat dipengaruhi oleh *flashing cascade* dan *flow regime*. Penelitian ini fokus pada kondisi *downhole* tanpa mengaitkan dengan pengaruh operasi permukaan terhadap kualitas sampel yang diambil [6].

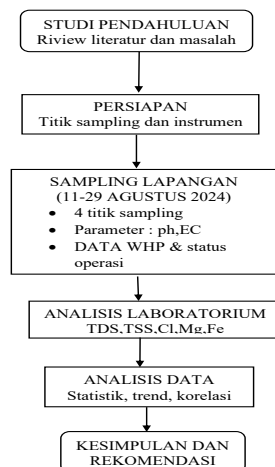
Menganalisis *scaling zone* pada *slotted liner* dengan mempertimbangkan *fluid flow pattern*, namun tidak membahas pengaruh konfigurasi separator dan aktivitas *bleeding* terhadap representasi data geokimia [7]. Menyediakan panduan komprehensif mengenai sampling *geothermal fluids* dan menekankan pentingnya stabilisasi kondisi serta dokumentasi parameter operasional, namun tidak memberikan data empiris mengenai pengaruh kuantitatif *bleeding* terhadap konsentrasi *suspended solids* dan ion *mayor* [9]. Menganalisis hubungan antara *wellhead pressure* dan *saturation index scaling* pada sumur produksi *geothermal*, menunjukkan bahwa penurunan tekanan dapat meningkatkan potensi *scaling* CaCO_3 secara signifikan, namun penelitian tersebut menggunakan data geokimia dari *single sampling point* tanpa mempertimbangkan variabilitas spatial antar titik sampling [10].

Mengembangkan *geothermometer empiris* Na-K-Ca untuk *fluida natural* yang memerlukan sampel representatif, namun tidak membahas *quality control* pada kondisi operasi bervariasi [11]. Meneliti kontrol *scaling* silika menggunakan inhibitor pada sistem *geothermal*, menunjukkan bahwa konsentrasi silika sangat sensitif terhadap temperatur dan laju presipitasi dapat diprediksi dengan modeling kinetik [17]. Mengembangkan geoindicators Na-K-Mg-Ca untuk klasifikasi maturitas *fluida geothermal* dan identifikasi *mixing* dengan *groundwater*, namun analisis tersebut mengasumsikan sampel representatif tanpa membahas *quality control* sampling. Dari *review* literatur, teridentifikasi gap penelitian yaitu belum adanya studi komprehensif yang mengevaluasi secara kuantitatif pengaruh modus operasi (*online* vs *bleeding*) dan titik sampling terhadap variabilitas parameter geokimia serta implikasinya pada *quality assurance* data. Sumur X di Lapangan *Geothermal ABC* mengalami program stimulasi pada Agustus 2024 dengan berbagai konfigurasi operasional yang meliputi kondisi *online* (operasi normal) dan *bleeding* dengan intensitas bervariasi. Selama periode ini, dilakukan pengambilan sampel geokimia dari beberapa titik untuk monitoring kualitas fluida. Data operasional menunjukkan adanya indikasi *passing* (kebocoran) dari *dumping line* separator yang berpotensi memengaruhi kualitas sampel. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengkarakterisasi dinamika parameter geokimia brine (pH, EC, TDS, TSS, Cl, Mg, Fe) selama periode stimulasi dengan variasi WHP dan modus operasi, (2) mengevaluasi pengaruh kuantitatif kondisi operasional (*online* vs *bleeding*) dan titik sampling terhadap kualitas dan representasi data geokimia, (3) mengidentifikasi sumber variabilitas dan ketidakpastian data melalui analisis duplikasi dan *quality control*, serta (4) merumuskan rekomendasi perbaikan prosedur sampling dan operasi untuk meningkatkan reliabilitas data geokimia yang mendukung optimasi operasional jangka panjang.

2. METODE PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada Sumur X yang berlokasi di Lapangan *Geothermal* ABC di Indonesia. Fasilitas permukaan sumur dilengkapi dengan separator dua fase S-1, jalur *two-phase* dengan mini separator dan *bottom port*, serta sistem Atmospheric Flash Tank (AFT). Pengumpulan data dilaksanakan selama periode 11-29 Agustus 2024 yang mencakup fase operasi online dan program bleeding dengan intensitas bervariasi [8].



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Penelitian dilakukan secara sistematis dalam 6 tahapan. Sampling lapangan dilaksanakan pada 12 hari dalam periode 11-29 Agustus 2024 pada 4 titik berbeda dengan variasi kondisi operasional (online dan bleeding) untuk menangkap dinamika parameter geokimia. Analisis data mengintegrasikan evaluasi statistik, *trend temporal*, dan korelasi dengan parameter operasional untuk mengidentifikasi pengaruh modus operasi terhadap kualitas data dan merumuskan rekomendasi perbaikan prosedur.

B. Konfigurasi Fasilitas dan Titik Sampling

Sistem produksi sumur terdiri dari *wellhead* yang terhubung dengan separator S-1 melalui jalur *two-phase*. Separator S-1 beroperasi pada tekanan 14-25 barg untuk memisahkan fase uap dan fase cair (*brine*) [9]. Jalur *two-phase* dilengkapi dengan mini separator untuk sampling kondisi *intermediate* (antara) dan *bottom port* untuk sampling fase berat. *Brine* dari separator dialirkan ke AFT untuk *recovery* panas tambahan sebelum dibuang atau diinjeksikan kembali ke *reservoir* [10].

Empat titik sampling ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi yang berbeda sesuai dengan panduan *geothermal fluid* sampling [7][11]. Pertama, *Downstream* Separator S-1 yang merepresentasikan kondisi pemisahan optimal saat operasi normal. Kedua, *Two-Phase Line* Mini Separator yang merepresentasikan kondisi *intermediate* sebelum pemisahan penuh. Ketiga, *Two-Phase Line Bottom Port* yang merepresentasikan akumulasi fase berat dan partikulat. Keempat, *Discharge* AFT yang merepresentasikan kondisi akhir setelah *atmospheric flashing*. Pemilihan multi-titik ini bertujuan untuk memahami distribusi spasial parameter geokimia dan mengidentifikasi pengaruh proses pemisahan fase [12].

C. Prosedur Sampling dan Analisis

Sampling dilakukan sesuai prosedur standar *geothermal fluid* sampling [7][11]. Pada setiap titik, sampel diambil menggunakan *container stainless steel* setelah *flushing* (pembilasan) jalur sampling minimal 5 menit untuk memastikan sampel merepresentasikan kondisi aktual [13]. Parameter lapangan pH dan *electrical conductivity* (EC) diukur langsung menggunakan

portable meter yang dikalibrasi setiap hari. Sampel untuk analisis laboratorium dibagi menjadi dua botol yaitu sampel tanpa perlakuan untuk analisis TDS, TSS, dan Cl, serta sampel yang diasamkan dengan HNO_3 pekat hingga $\text{pH} < 2$ untuk analisis kation Mg dan Fe [14].

Analisis laboratorium meliputi pengukuran TDS dengan metode gravimetri setelah penguapan pada 180°C , TSS dengan metode filtrasi menggunakan filter $0.45\ \mu\text{m}$ dan penimbangan residu, Cl dengan titrasi argentometri mengikuti metode Mohr, serta Mg dan Fe dengan *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) [14]. *Quality control* dilakukan dengan menganalisis duplikasi sampel pada beberapa tanggal untuk memverifikasi konsistensi hasil, terutama untuk parameter Mg yang menunjukkan variabilitas tinggi [15].

D. Data Operasional

Parameter operasional yang dicatat meliputi *wellhead pressure* (WHP) dalam satuan barg, *throttle opening* dalam satuan inch untuk kondisi tertentu, status operasi berupa online atau *bleeding* dengan jumlah putaran valve, serta *remark* lapangan mengenai kondisi khusus seperti indikasi *passing* dari *dumping line* [16]. Data operasional ini diintegrasikan dengan data geokimia untuk analisis korelasi sesuai dengan pendekatan yang digunakan dalam penelitian sebelumnya [9][12].

E. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui beberapa tahapan sesuai dengan metodologi yang telah dikembangkan untuk sistem *geothermal* [2]. Pertama, pembersihan data yang meliputi identifikasi nilai yang hilang, normalisasi satuan, dan penandaan *outlier* berdasarkan distribusi statistik. Kedua, perhitungan statistik deskriptif untuk setiap parameter pada masing-masing titik sampling dan status operasi yang meliputi nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan standar deviasi. Ketiga, analisis komparatif untuk membandingkan parameter geokimia antar titik sampling pada waktu yang sama guna mengidentifikasi perbedaan akibat pemisahan fase atau *entrainment* (terbawanya partikel) [4][5]. Keempat, analisis *trend temporal* dengan *plotting time series* untuk mengidentifikasi pola perubahan selama periode observasi. Kelima, analisis korelasi sederhana antara parameter operasional (WHP, status operasi) dengan parameter geokimia (TSS, Cl, TDS) menggunakan *scatter plot*.

Interpretasi data mempertimbangkan *remark* operasional terutama indikasi *passing* dari *dumping line* yang dapat menyebabkan kontaminasi sampel [6]. Keterbatasan analisis mencakup tidak tersedianya data temperatur fluida, laju alir massa, dan kandungan silika yang penting untuk perhitungan *saturation index*, sehingga fokus analisis diarahkan pada aspek operasional dan *quality control* data [2].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Geokimia Fluida Brine

Data geokimia fluida *brine* dari keempat titik sampling selama periode Agustus 2024 ditunjukkan pada Tabel 1. Ringkasan statistik deskriptif untuk setiap titik sampling disajikan pada Tabel 2. *Fluida brine* menunjukkan karakteristik dominan klorida dengan salinitas tinggi yang khas untuk sistem *geothermal* [1][7]. Nilai pH berkisar antara 4.49 hingga 6.45 dengan kecenderungan lebih rendah pada jalur *two-phase* saat *bleeding* dan lebih tinggi pada *discharge* AFT. Pola ini konsisten dengan proses fraksinasi CO_2 selama *flashing* dimana fase uap membawa sebagian besar gas asam sehingga *brine* yang tersisa menjadi lebih netral [3]. *Electrical conductivity* menunjukkan variasi luas antara 22,400 hingga 47,370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ yang mencerminkan perbedaan konsentrasi ion terlarut total. TDS berkisar antara 10,708 hingga 48,736

ppm dengan nilai tertinggi umumnya dijumpai pada *Bottom Port* dan *Discharge AFT* yang mengindikasikan konsentrasi fase berat [4].

Konsentrasi klorida sebagai ion dominan berkisar antara 15,508 hingga 27,990 ppm dengan perbedaan yang cukup besar antar titik sampling. S-1 *Downstream* menunjukkan Cl relatif stabil pada kisaran 15,886-21,938 ppm dengan rata-rata 18,875 ppm, sementara *Discharge AFT* menunjukkan Cl lebih tinggi dengan rata-rata 25,202 ppm. Perbedaan ini mengindikasikan adanya pemisahan fase yang tidak sempurna atau adanya *carry-over* (terbawanya fluida) dari jalur dumping pada AFT [9].

Tabel 1. Data Geokimia Fluida Brine Periode 11-29 Agustus 2024

Tanggal	Titik Sampling	Status	WHP (Barg)	pH	EC (μS/cm)	TDS (ppm)	TSS (ppm)	Cl (ppm)	Mg (ppm)	Fe (ppm)
11/8 09:10	S-1 Downstream	Online	16.39	5.28	41,320	38,352	126	19,669	5.20	2.93
11/8 10:35	Mini Separator	Bleeding	10.31	4.49	41,820	10,708	2,560	17,777	0.56	2.45
11/8 10:35	Bottom Port	Bleeding	10.31	5.26	38,420	48,034	3,922	27,612	1.81	7.06
11/8 10:40	Discharge AFT	Bleeding	10.31	5.97	38,880	43,420	4,598	27,234	1.76	5.39
11/8 14:00	Mini Separator	Bleeding	8.97	4.66	37,900	27,856	502	15,508	0.30	2.94
11/8 14:00	Bottom Port	Bleeding	8.97	5.36	41,280	41,420	3,424	22,695	0.87	7.49
11/8 14:10	Discharge AFT	Bleeding	8.97	6.03	43,460	46,056	4,272	27,234	1.16	0.99
12/8 14:05	S-1 Downstream	Online	14.58	5.82	41,380	35,016	2,908	21,938	2.06	5.74
13/8 14:30	S-1 Downstream	Online+Bleed	11.30	5.66	31,030	34,618	362	18,912	3.94	3.85

Tanggal	Titik Sampling	Status	WHP (Barg)	pH	EC (μS/cm)	TDS (ppm)	TSS (ppm)	Cl (ppm)	Mg (ppm)	Fe (ppm)
13/8 14:35	Dis-charge AFT	Online+Bleed	11.30	6.28	35,040	42,974	4,676	22,695	5.26	2.23
13/8 14:35	Bottom Port	Online+Bleed	11.30	5.68	36,610	43,308	4,676	22,695	1.87	2.44
14/8 17:36	Dis-charge AFT	Bleeding 10	21.47	6.45	33,330	39,590	4,526	21,182	4.02	2.75
15/8 09:15	Dis-charge AFT	Bleeding 10	21.34	6.29	41,650	42,634	3,726	23,451	4.16	1.95
15/8 13:20	Dis-charge AFT	Bleeding 10	21.04	6.41	40,200	46,300	1,334	25,721	1.49	3.80
15/8 15:00	Dis-charge AFT	Bleeding 12	22.41	6.27	47,370	42,826	1,472	26,477	4.61	9.03
16/8 09:20	Dis-charge AFT	Bleeding 10	19.70	6.30	35,020	38,622	2,100	24,964	0.99	3.88
16/8 10:20	Dis-charge AFT	Bleeding 8	18.81	6.34	37,770	46,908	820	27,612	0.54	4.58
16/8 15:15	S-1 Down-stream	Online	24.90	6.08	38,110	30,656	3,084	18,156	0.38	6.90
16/8 21:28	S-1 Down-stream	Online	18.20	5.72	28,200	35,768	2,332	18,912	9.91	6.39
17/8 09:00	S-1 Down-stream	Online	17.10	5.83	27,120	33,894	2,686	18,912	7.00	5.26
18/8 09:20	Dis-charge AFT	Bleeding 7	26.15	6.17	37,540	48,736	994	27,990	2.88	3.84

Tanggal	Titik Sampling	Status	WHP (Barg)	pH	EC (μS/cm)	TDS (ppm)	TSS (ppm)	Cl (ppm)	Mg (ppm)	Fe (ppm)
19/8 08:45	S-1 Downstream	Online	22.18	5.76	35,930	39,674	780	18,912	8.97	-
23/8 11:35	S-1 Downstream	Online	18.58	6.11	22,400	33,102	-	18,156	0.81	-
29/8 09:30	S-1 Downstream	Online	18.68	5.94	34,640	-	-	15,886	3.28	-

Tabel 2. Statistik Deskriptif Parameter Geokimia per Titik Sampling

Titik Sampling	Parameter	Min	Max	Rata-rata	Std Dev	N
S-1 Downstream	pH	5.28	6.11	5.79	0.25	9
	TDS (ppm)	30,656	39,674	35,260	2,870	8
	TSS (ppm)	126	3,084	1,754	1,205	8
	Cl (ppm)	15,886	21,938	18,875	1,590	9
Mini Separator	pH	4.49	4.66	4.58	0.12	2
	TDS (ppm)	10,708	27,856	19,282	12,125	2
	TSS (ppm)	502	2,560	1,531	1,455	2
	Cl (ppm)	15,508	17,777	16,643	1,605	2
Bottom Port	pH	5.26	5.68	5.43	0.19	3
	TDS (ppm)	41,420	48,034	44,254	3,400	3
	TSS (ppm)	3,424	4,676	4,007	723	3
	Cl (ppm)	22,695	27,612	24,334	2,838	3
Discharge AFT	pH	5.97	6.45	6.27	0.14	11
	TDS (ppm)	38,622	48,736	43,606	3,195	11
	TSS (ppm)	820	4,676	2,683	1,497	11
	Cl (ppm)	21,182	27,990	25,202	2,276	11

Total *suspended solids* menunjukkan variabilitas sangat tinggi dari 126 hingga 4,676 ppm dengan pola yang jelas terkait dengan status operasi. Pada kondisi online di S-1, TSS cenderung rendah dengan rata-rata 1,754 ppm, sementara pada *Discharge AFT* saat *bleeding*, TSS meningkat signifikan dengan rata-rata 2,683 ppm dan puncak hingga 4,676 ppm. Konsentrasi magnesium umumnya rendah (0.30-9.91 ppm) yang konsisten dengan fluida *geothermal mature* dimana Mg telah habis bereaksi dengan batuan *reservoir* pada temperatur tinggi [10]. Konsentrasi besi menunjukkan variasi 0.99-9.03 ppm dengan kecenderungan meningkat saat TSS tinggi yang mengindikasikan kontribusi dari partikulat oksida besi atau produk korosi.

B. Pengaruh Titik Sampling terhadap Kualitas Data

Perbandingan parameter geokimia antar titik sampling pada waktu yang sama menunjukkan perbedaan yang cukup besar dan mencerminkan efek pemisahan fase serta *entrainment*. Gambar 1 menunjukkan perbandingan TDS dan TSS antara Mini Separator dan *Bottom Port* pada tanggal 11 Agustus pukul 10:35 dan 14:00.



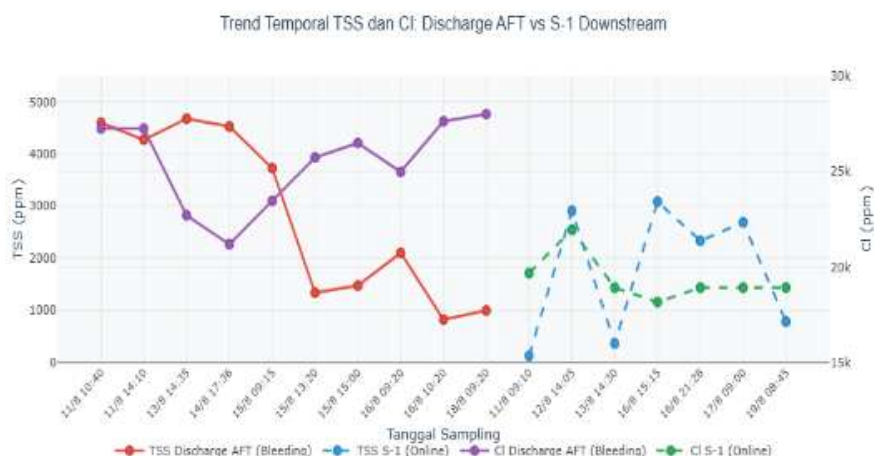
Gambar 2. Perbandingan TDS dan TSS antara Mini Separator dan Bottom Port pada 11 Agustus 2024

Seperti terlihat pada Gambar 2, pada kondisi WHP 10.31 barg (jam 10:35), *Bottom Port* menunjukkan TDS 48,034 ppm dan TSS 3,922 ppm yang jauh lebih tinggi dibandingkan Mini Separator dengan TDS 10,708 ppm dan TSS 2,560 ppm. Pola serupa terlihat pada jam 14:00 dimana *Bottom Port* mencatat TDS 41,420 ppm dan TSS 3,424 ppm sedangkan Mini Separator menunjukkan TDS 27,856 ppm dan TSS 502 ppm. Perbedaan yang sangat besar ini mengindikasikan bahwa *Bottom Port* merepresentasikan akumulasi fase berat dengan konsentrasi padatan tersuspensi dan ion terlarut yang lebih tinggi akibat efek gravitasi dan dinamika aliran [4].

Konsentrasi klorida juga menunjukkan pola yang sama dimana *Bottom Port* konsisten lebih tinggi (22,695-27,612 ppm) dibanding Mini Separator (15,508-17,777 ppm). Hal ini menegaskan bahwa posisi sampling dalam jalur *two-phase* sangat menentukan representasi data yang diperoleh. Mini Separator cenderung menangkap fase yang lebih ringan dengan *entrainment* yang lebih sedikit, sementara *Bottom Port* mengakumulasi fase berat dan partikulat. Untuk tujuan karakterisasi *reservoir*, sampling dari Mini Separator lebih merepresentasikan *brine* yang telah mengalami pemisahan awal, sedangkan *Bottom Port* lebih cocok untuk evaluasi *carry-over* dan potensi *scaling* dari fase yang lebih pekat [5].

C. Pengaruh Operasi terhadap Parameter Geokimia

Gambar 3 menunjukkan *trend* TSS dan Cl pada *Discharge* AFT selama periode *bleeding* dan perbandingannya dengan S-1 saat online. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, *Discharge* AFT selama periode *bleeding* (11-18 Agustus) menunjukkan TSS yang berfluktuasi dan umumnya tinggi dengan rentang 820-4,676 ppm dan rata-rata 2,683 ppm. Pada tanggal 11 Agustus pukul 10:40 saat *bleeding* dengan WHP 10.31 barg, TSS mencapai 4,598 ppm dengan *remark* "kemungkinan masih adanya *passing* dari *dumping line*". Pola serupa terlihat pada 13 Agustus pukul 14:35 dimana TSS mencapai puncak 4,676 ppm saat kondisi online plus *bleeding* dengan *remark* yang sama. Sebaliknya, S-1 *Downstream* pada kondisi online menunjukkan TSS yang lebih rendah dan relatif stabil dengan rentang 126-3,084 ppm dan rata-rata 1,754 ppm.



Gambar 3. Trend TSS dan Cl pada *Discharge* AFT (*bleeding*) dan S-1 Downstream (*online*)

Konsentrasi klorida menunjukkan pola yang konsisten dimana *Discharge* AFT saat *bleeding* memiliki Cl rata-rata 25,202 ppm dibanding S-1 online dengan Cl rata-rata 18,875 ppm. Perbedaan ini tidak dapat dijelaskan semata oleh variasi kondisi *reservoir* melainkan mengindikasikan adanya kontaminasi atau pencampuran dengan fluida dari jalur *dumping* yang memiliki konsentrasi lebih tinggi akibat akumulasi [6]. Aktivitas *bleeding* membuka jalur komunikasi dengan separator lain melalui *dumping line* sehingga sampel pada AFT tidak murni merepresentasikan produksi sumur tetapi telah tercampur dengan *fluida* dari separator lain. Tabel 3 merangkum perbandingan parameter geokimia antara kondisi online dan *bleeding*.

Tabel 3. Perbandingan Parameter Geokimia: Kondisi Online vs Bleeding

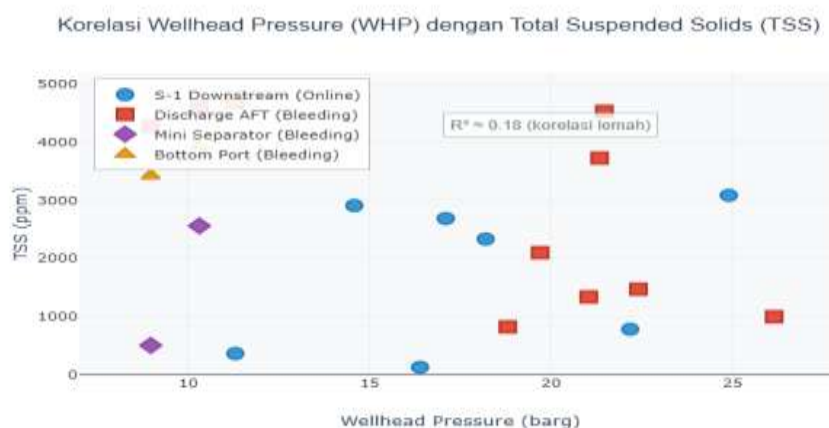
Parameter	S-1 Online	<i>Discharge</i> AFT <i>Bleeding</i>	Perbedaan (%)
pH	5.79 ± 0.25	6.27 ± 0.14	+8.3
EC (μS/cm)	33,344 ± 6,421	38,815 ± 4,353	+16.4
TDS (ppm)	35,260 ± 2,870	43,606 ± 3,195	+23.7
TSS (ppm)	1,754 ± 1,205	2,683 ± 1,497	+52.9

Parameter	S-1 Online	Discharge AFT Bleeding	Perbedaan (%)
Cl (ppm)	18,875 ± 1,590	25,202 ± 2,276	+33.5

Seperti terlihat pada Tabel 3, *bleeding* menyebabkan peningkatan yang cukup besar pada semua parameter kecuali Mg dan Fe. TSS meningkat 52.9%, Cl meningkat 33.5%, dan TDS meningkat 23.7% dibanding kondisi online. Peningkatan pH sebesar 8.3% konsisten dengan degassing CO₂ yang lebih intensif saat *flashing* pada tekanan lebih rendah di AFT [3]. Penurunan Mg dan Fe pada AFT kemungkinan disebabkan oleh presipitasi oksida/hidroksida pada pH yang lebih tinggi atau dilusi oleh *fluida* dalam jumlah yang lebih besar dari *dumping line* [11].

D. Korelasi WHP dengan Parameter Geokimia

Gambar 4 menunjukkan *scatter plot* antara WHP dengan TSS untuk semua titik sampling. Seperti terlihat pada Gambar 4, korelasi antara WHP dan TSS tidak menunjukkan pola linier yang kuat ($R^2 \approx 0.18$). Pada *Discharge* AFT, TSS tinggi (lebih dari 3,000 ppm) dapat terjadi pada rentang WHP yang cukup lebar dari 10.31 hingga 22.41 barg. Hal ini mengindikasikan bahwa WHP bukan faktor tunggal yang mengendalikan TSS. Pada S-1 *Downstream* dengan kondisi online, meskipun WHP bervariasi antara 14.58 hingga 24.90 barg, TSS tetap relatif rendah (126-3,084 ppm) yang menunjukkan efektivitas pemisahan pada separator [9].



Gambar 4. Scatter plot korelasi WHP vs TSS berdasarkan titik sampling dan status operasi

Analisis lebih detail menunjukkan bahwa kombinasi WHP rendah (di bawah 12 barg) dengan status *bleeding* menghasilkan TSS tertinggi (3,424-4,676 ppm) terutama pada *Bottom Port* dan *Discharge* AFT. Pada WHP sedang hingga tinggi (18-26 barg), TSS pada *Discharge* AFT saat *bleeding* tetap bervariasi (820-4,526 ppm) yang mengindikasikan pengaruh dominan dari faktor lain seperti passing dari *dumping line* dan konfigurasi valve. Temuan ini menegaskan bahwa untuk mengendalikan TSS, tidak cukup hanya mengoptimalkan WHP tetapi perlu memperhatikan isolasi jalur *dumping* dan konfigurasi pemisahan [12].

E. Variabilitas dan Quality Control Magnesium

Konsentrasi magnesium menunjukkan beberapa anomali dan ketidakpastian yang penting untuk *quality control*. Pada beberapa tanggal dilakukan analisis duplikasi untuk verifikasi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Analisis Duplikasi Magnesium

Tanggal	Titik Sampling	Status	Mg Analisis 1 (ppm)	Mg Analisis 2 (ppm)	Deviasi (%)
16/8 21:28	<i>S-1 Downstream</i>	Online	9.91	11.10	12.0
17/8 09:00	<i>S-1 Downstream</i>	Online	7.00	6.02	14.0
18/8 09:20	<i>Discharge AFT</i>	Bleeding 7	2.88	8.29	187.8

Seperti terlihat pada Tabel 4, deviasi antara analisis duplikasi bervariasi dari 12.0% hingga 187.8% dengan kasus ekstrem pada tanggal 18 Agustus di *Discharge AFT*. Deviasi tinggi ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor yaitu heterogenitas sampel akibat partikulat yang tidak terdistribusi merata, tidak dilakukannya *filtrasi on-site* sehingga Mg partikulat dan terlarut tercampur, kontaminasi selama *handling* terutama pada sampel yang tidak langsung diasamkan, atau variabilitas analitik pada konsentrasi rendah mendekati *detection limit* instrumen [15].

Konsentrasi Mg umumnya rendah (sebagian besar di bawah 5 ppm kecuali beberapa outlier) yang konsisten dengan fluida *geothermal mature* dimana Mg telah habis bereaksi membentuk klorit, talk, atau mineral magnesium silikat pada temperatur *reservoir* yang tinggi [10,17]. Namun demikian, nilai tinggi yang muncul secara sporadis (9.91 dan 11.10 ppm pada 16 Agustus, 8.29 ppm pada 18 Agustus) perlu dievaluasi apakah merepresentasikan kondisi aktual atau artefak dari proses sampling dan analisis. Untuk meningkatkan reliabilitas, diperlukan protokol filtrasi lapangan menggunakan filter 0.45 μm segera setelah sampling dan pengasaman untuk fraksi terlarut, pemisahan fraksi partikulat untuk analisis tersendiri, serta analisis tripplikasi untuk parameter kritis dengan konsentrasi rendah [13].

F. Implikasi Operasional dan Rekomendasi

Hasil analisis menunjukkan beberapa implikasi penting untuk operasional dan *quality assurance*. Pertama, data geokimia dari *Discharge AFT* selama *bleeding* tidak merepresentasikan kondisi aktual *reservoir* tetapi telah terkontaminasi oleh passing dari *dumping line* separator. Hal ini mengharuskan isolasi yang lebih ketat pada jalur *dumping* atau pemilihan titik sampling alternatif saat *bleeding* [6]. Kedua, perbedaan yang sangat besar antara Mini Separator dan *Bottom Port* menunjukkan pentingnya mendefinisikan "sampel representatif" sesuai tujuan analisis. Untuk karakterisasi *reservoir*, Mini Separator lebih disarankan, sementara untuk evaluasi *scaling* potensial pada separator, *Bottom Port* memberikan *worst-case scenario* [5].

Ketiga, TSS tinggi pada *Discharge AFT* tidak semata disebabkan oleh kondisi *reservoir* tetapi lebih dominan akibat *entrainment* operasional. Hal ini memerlukan interpretasi yang hati-hati dalam menggunakan data TSS untuk diagnosis *reservoir* atau produktivitas sumur. Keempat, variabilitas Mg dan ketidakpastian analisis menegaskan kebutuhan *protocol quality control* yang lebih ketat mencakup filtrasi, pengasaman, duplikasi, dan dokumentasi kondisi sampling [15].

Berdasarkan temuan ini, dirumuskan strategi perbaikan operasional dan sampling yang terintegrasi sebagai berikut. Untuk protokol sampling, diperlukan stabilisasi kondisi operasi minimal 15-30 menit sebelum pengambilan sampel untuk memastikan kondisi *steady-state*,

isolasi jalur dumping dengan menutup valve saat sampling pada AFT untuk menghindari *passing*, *flushing* jalur sampling minimal 5-10 menit sebelum pengambilan untuk membuang *stagnant fluid*, serta *filtrasi on-site* menggunakan *filter* 0.45 μm untuk memisahkan fraksi terlarut dan partikulat dengan analisis terpisah [7][13].

Untuk penanganan sampel, diperlukan pengasaman segera setelah filtrasi untuk sampel kation dengan HNO_3 pekat hingga $\text{pH} < 2$, penggunaan botol tertutup rapat dan gelap untuk mencegah oksidasi dan presipitasi, serta penyimpanan dingin (4°C) dan pengiriman cepat ke laboratorium maksimal 48 jam [14]. Untuk dokumentasi, diperlukan pencatatan sistematis parameter operasional pada saat sampling meliputi WHP, WHT, *throttle opening*, separator *pressure*, serta status operasi dan aktivitas *bleeding* dengan jumlah putaran valve. Selain itu, perlu dicatat kondisi khusus seperti indikasi *passing*, *maintenance activity*, atau perubahan konfigurasi, serta foto sampling point dan kondisi visual fluida untuk audit *trail* [16].

Untuk *quality control* laboratorium, diperlukan analisis duplikasi minimal 10% dari total sampel terutama untuk parameter kritis Mg, Fe, dan silika (bila ditambahkan), perhitungan ion balance error untuk memastikan konsistensi data dengan toleransi maksimal 5%, serta partisipasi dalam *interlaboratory comparison* atau penggunaan *certified reference materials* untuk validasi akurasi metode [15]. Sangat disarankan juga untuk melengkapi parameter analisis dengan temperatur fluida *in-situ* pada setiap titik sampling untuk koreksi aktivitas dan perhitungan *saturation index*, analisis silika (SiO_2) yang merupakan parameter kunci untuk evaluasi *scaling* dan geotermometri, pengukuran alkalinitas total untuk perhitungan ion balance dan spesi karbonat, serta analisis kation mayor lain (Na, K, Ca) dan anion (SO_4 , F, B) untuk karakterisasi lengkap dan pemodelan geokimia dengan software seperti PHREEQC [2][18].

4. SIMPULAN

Penelitian ini mengkarakterisasi dinamika parameter geokimia brine selama program stimulasi Sumur X di Lapangan *Geothermal ABC* periode Agustus 2024 dan mengevaluasi pengaruh kondisi operasional terhadap kualitas data. Hasil menunjukkan bahwa fluida *brine* memiliki karakteristik klorida dengan salinitas tinggi yang tipikal untuk sistem *geothermal*, dengan konsentrasi Cl rata-rata 18,875 ppm pada S-1 saat online dan 25,202 ppm pada *Discharge* AFT saat *bleeding*. Modus operasi *bleeding* menyebabkan peningkatan signifikan pada TSS (rata-rata 2,683 ppm vs 1,754 ppm pada online) dan Cl (33.5% lebih tinggi) yang terutama disebabkan oleh *entrainment* dan *passing* dari *dumping line*. Perbedaan ekstrem antara Mini Separator dan *Bottom Port* menunjukkan efek fraksinasi fase yang kuat, dimana pemilihan titik sampling harus disesuaikan dengan tujuan analisis. *Wellhead pressure* tidak berkorelasi kuat dengan TSS, menunjukkan bahwa konfigurasi pemisahan dan status valve lebih dominan menentukan kualitas sampel.

Strategi perbaikan yang direkomendasikan meliputi implementasi SOP sampling dengan stabilisasi operasi, isolasi *dumping line*, dan filtrasi *on-site* 0.45 μm , penanganan sampel yang mencakup pengasaman segera dan penyimpanan dingin, dokumentasi sistematis parameter operasional dan kondisi khusus pada setiap sampling, serta peningkatan *quality control* laboratorium dengan analisis duplikasi minimal 10% dan perhitungan *ion balance error*. Pelengkapan parameter analisis dengan temperatur *in-situ*, silika, alkalinitas, dan ion mayor lainnya sangat disarankan untuk memungkinkan perhitungan *saturation index* dan pemodelan geokimia yang lebih komprehensif guna mendukung optimasi operasional dan strategi pengelolaan lapangan jangka panjang.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Gunnlaugsson, H. Ármannsson, S. Thorhallsson, and B. Steingrímsson, "Problems in geothermal operation – scaling and corrosion," in Proceedings, Santa Tecla Workshop, 2014.
- [2] D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, "Description of input and examples for PHREEQC version 3," U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Chapter A43, 2013.
- [3] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, and B. Y. Suranta, "Heat loss effect analysis by using JIWAFlow wellbore simulation in geothermal field Well-Y," 3RD BOROBUDUR INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SCIENCE AND TECHNOLOGY 2021, vol. 2706, no. 1, p. 020116. AIP Publishing LLC, 2023.
- [4] B. Köhl, M. Elsner, and T. Baumann, "Hydrochemical and operational parameters driving carbonate scale kinetics at geothermal facilities," *Geothermal Energy*, vol. 8, no. 1, 2020.
- [5] 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," 2024.
- [6] A. Sofyan, S. Wiharti, J. Szanyi, 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'," 2024.
- [7] K. Nicholson, *Geothermal Fluids*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
- [8] R. Idroes and M. Yusuf, "Geochemistry exploration and geothermometry application in the North Zone of Seulawah Agam," *Energies*, vol. 12, no. 23, p. 4442, 2019.
- [9] 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.
- [10] R. O. Fournier and A. H. Truesdell, "An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 37, no. 5, pp. 1255–1275, 1973.
- [11] E. Mroczek et al., "Silica scale control using inhibitors," in *New Zealand Geothermal Workshop Proceedings*, 2015.
- [12] 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, 2023.
- [13] 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, 2025.
- [14] APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017.
- [15] J. K. Taylor and C. E. Kuyatt, "Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results," NIST Technical Note 1297, 1994.
- [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," 2021.
- [17] W. F. Giggenbach, "Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 52, no. 12, pp. 2749–2765, 1988.
- [18] C. A. J. Appelo and D. Postma, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed. Leiden, Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005.