ANALISIS GEOKIMIA *BRINE* UNTUK IDENTIFIKASI POTENSI *SCALE* SILIKA DAN BESI MENGGUNAKAN PHREEQC

Muhammad Alfaruq Cahya Putra[1], Akhmad Sofyan[1*]
[1]Teknik Produksi Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, 58315
**E-mail*: akhmads@esdm.go.id

ABSTRAK

Brine reservoir merupakan fluida salin dengan komposisi ionik kompleks yang dapat memicu pembentukan mineral *scale* pada sistem produksi, separator, tubing, maupun fasilitas permukaan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kecenderungan pembentukan *scale* pada sampel *brine* dari Sumur-X di Lapangan-Y menggunakan pemodelan geokimia PHREEQC. Data utama yang digunakan meliputi pH, temperatur, klorida, natrium, kalium, kalsium, magnesium, besi, litium, silika, dan alkalinitas. Selain analisis laboratorium, penelitian ini juga menjelaskan prosedur *sampling brine* agar data kimia yang digunakan tetap representatif. Pemodelan dilakukan menggunakan PHREEQC dengan basis data *phreeqc.dat* pada temperatur 25°C untuk memperoleh kekuatan ionik, distribusi spesies terlarut, serta indeks saturasi mineral. Hasil simulasi pada temperatur 25°C menunjukkan bahwa *brine* memiliki pH 6,53, konduktivitas spesifik 40,375 µS/cm, densitas 1,01431 g/cm^3, dan kekuatan ionik 0,414 mol/kgw. Mineral silika menunjukkan supersaturasi, yaitu kuarsa dengan *Saturation Index* (SI) 2,22, kalsedon 1,79, dan SiO_2 amorf 0,95. $Fe(OH)_3$(a) juga menunjukkan supersaturasi ringan dengan SI 0,51 sebagai indikasi awal karena bergantung pada kondisi redoks. Sebaliknya, kalsit, aragonit, dolomit, halit, silvit, dan siderit berada dalam kondisi undersaturasi. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi pemodelan 25°C, risiko *scale* utama pada *brine* Sumur-X tidak didominasi oleh karbonat, melainkan oleh silika dan hidroksida besi, sehingga mitigasi perlu diprioritaskan pada pengendalian silika dan besi. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi data *sampling brine* dengan pemodelan PHREEQC untuk menegaskan prioritas mitigasi *scale* berbasis mineral dominan. Pemodelan pada temperatur dan tekanan operasi serta validasi lapangan diperlukan sebagai penelitian lanjutan.

Kata kunci: besi, *brine*, PHREEQC, *scale*, silika

1. PENDAHULUAN

Pembentukan mineral *scale* merupakan salah satu permasalahan penting dalam operasi produksi fluida bawah permukaan, baik pada sistem minyak dan gas, panas bumi, maupun pengelolaan air terproduksi. *Scale* dapat terbentuk ketika komposisi kimia fluida mengalami kondisi jenuh atau lewat jenuh terhadap mineral tertentu, sehingga mineral tersebut mengendap pada tubing, casing, separator, *flowline*, maupun fasilitas permukaan. Endapan ini dapat menurunkan laju alir, memperbesar kehilangan tekanan, menurunkan efisiensi pemisahan, serta meningkatkan biaya perawatan dan intervensi sumur [1], [2].

Pada sistem panas bumi dan fluida *reservoir* bersalinitas tinggi, pembentukan *scale* sangat dipengaruhi oleh perubahan tekanan, temperatur, pH, pelepasan gas, pencampuran fluida, serta konsentrasi ion terlarut. Penelitian Sofyan dkk [3] menunjukkan bahwa tekanan kepala sumur dapat memengaruhi nilai *Scale Saturation Index*, laju pembentukan *scale*, dan waktu pembentukan *scale* pada sumur produksi panas bumi. Hal ini menegaskan bahwa evaluasi *scale* perlu mempertimbangkan perubahan kondisi operasi, bukan hanya komposisi kimia fluida.

Brine merupakan fluida dengan kandungan ion terlarut tinggi yang umumnya didominasi oleh Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, HCO_3^-, Fe, dan Si. Komposisi kimia tersebut dapat digunakan untuk menilai kecenderungan pembentukan mineral *scale*. Namun, konsentrasi unsur saja belum cukup untuk menentukan potensi pengendapan karena reaksi geokimia dipengaruhi oleh

aktivitas ion, kompleksasi, kekuatan ionik, serta kesetimbangan mineral-larutan [4], [5]. Oleh karena itu, pemodelan geokimia diperlukan untuk mengidentifikasi jenis mineral yang paling mungkin mengendap.

PHREEQC merupakan perangkat lunak geokimia yang banyak digunakan untuk menghitung spesiasi larutan, indeks saturasi mineral, reaksi kesetimbangan, dan interaksi air-batuan. Program ini memungkinkan interpretasi yang lebih detail terhadap kecenderungan pembentukan *scale* karena mampu menghitung aktivitas ion dan hubungan kesetimbangan antarspesies [6]. Dalam konteks pengelolaan sumur, pendekatan pemodelan seperti ini dapat membantu menentukan apakah *scale* yang dominan berasal dari karbonat, silika, besi, sulfat, atau mineral lain.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas hubungan antara pola aliran fluida dan zona *scaling* pada sumur panas bumi. Sofyan dkk [7] mengidentifikasi zona dan tipe *scaling* berdasarkan pola aliran fluida di sumur panas bumi Salak. Selain itu, penelitian juga menunjukkan bahwa tipe *scale* pada *slotted liner* dapat ditentukan melalui analisis pola aliran fluida [8]. Kajian tersebut memperlihatkan bahwa lokasi dan jenis *scale* sangat berkaitan dengan dinamika aliran, perubahan fase, serta karakteristik kimia fluida. Selain itu, perencanaan penanganan *scale* dengan metode mekanik seperti *broaching* juga telah diterapkan pada sumur panas bumi uap dominan untuk mengatasi penurunan performa akibat deposit *scale* [9]. Kajian yang lebih luas mengenai pembentukan dan rencana penanganan *scale* pada sumur panas bumi di Indonesia dirangkum oleh Sofyan [10].

Strategi mitigasi *scale* harus disesuaikan dengan jenis mineral dominan. *Scale* karbonat umumnya dapat dikendalikan dengan inhibitor karbonat atau perlakuan asam, sedangkan *scale* silika sering lebih sulit dilarutkan dan membutuhkan pendekatan yang lebih spesifik. Deposit besi juga dapat terbentuk akibat oksidasi Fe^{2+} menjadi Fe^{3+} atau akibat proses korosi pada fasilitas produksi [11], [12]. Oleh sebab itu, identifikasi mineral dominan menjadi tahap awal yang penting sebelum menentukan metode pencegahan maupun *treatment*.

Penelitian ini menggunakan data *brine* dari satu sumur yang disamarkan sebagai Sumur-X pada Lapangan-Y. Penyamaran dilakukan untuk menjaga kerahasiaan data teknis lapangan, tanpa mengurangi nilai ilmiah dari interpretasi geokimia. Data kimia fluida dimodelkan menggunakan PHREEQC pada temperatur 25°C untuk memperoleh distribusi spesies terlarut dan indeks saturasi mineral. Mineral yang dievaluasi meliputi kuarsa, kalsedon, SiO_2 amorf, $Fe(OH)_3(a)$, kalsit, aragonit, dolomit, halit, silvit, dan siderit

Kebaruan penelitian ini adalah integrasi data *sampling brine* dengan pemodelan PHREEQC untuk menegaskan bahwa pada *brine* Sumur-X Lapangan-Y, risiko *scale* utama pada kondisi pemodelan 25°C lebih dikontrol oleh supersaturasi silika dan hidroksida besi, bukan oleh mineral karbonat yang umumnya menjadi fokus utama dalam studi *scale*. Hasil ini memberikan dasar teknis yang lebih tajam untuk pemilihan strategi mitigasi, terutama pada sistem fluida salin dengan kandungan silika tinggi. Penelitian ini tidak membandingkan hasil dengan data deposit lapangan; pemodelan pada variasi temperatur dan tekanan serta validasi lapangan merupakan tahap lanjutan.

2. METODE

Metode penelitian terdiri dari pengambilan sampel *brine*, analisis kimia, pemodelan geokimia menggunakan PHREEQC, serta interpretasi indeks saturasi mineral pada Sumur-X dan Lapangan-Y.

A. Pengambilan Sampel *Brine*

Pengambilan sampel dilakukan pada titik *sampling* yang mewakili fluida produksi dari Sumur-X. Titik *sampling* dipilih pada jalur produksi sebelum fluida mengalami pencampuran

signifikan dengan bahan kimia tambahan atau fluida eksternal. Sebelum sampel diambil, *valve sampling* dibuka selama beberapa menit untuk membuang fluida stagnan dan memastikan bahwa sampel yang diperoleh merupakan fluida representatif dari sistem produksi.

Pengambilan sampel dilakukan pada Juli–September 2022 dengan mengacu pada ASTM E1675 (praktik standar pengambilan sampel fluida panas bumi dua fase untuk analisis kimia) dan Nicholson [13], [14]: air dipisahkan menggunakan *mini separator* dan pendingin yang dihubungkan ke port sampel pada pipa produksi dua fase. Sampel dikumpulkan menggunakan botol polietilena (HDPE) bermulut sempit yang bersih, dan botol dibilas terlebih dahulu menggunakan fluida sampel sebanyak tiga kali sebelum pengisian akhir. Untuk analisis kation logam seperti Fe, Ca, Mg, Na, K, dan Li, sampel disaring menggunakan membran 0,45 μm dan diawetkan dengan penambahan asam nitrat (HNO_3) 6 N hingga pH kurang dari 3; batas $pH < 3$ ini lebih longgar daripada $pH < 2$ yang umum direkomendasikan pada pustaka. Pengawetan ini bertujuan mencegah pengendapan logam selama transportasi dan penyimpanan [15].

Untuk analisis anion dan alkalinitas, sampel tidak diasamkan dan disimpan dalam botol tertutup rapat untuk meminimalkan pertukaran CO_2 dengan atmosfer. Parameter pH, konduktivitas listrik (EC), potensial redoks, TDS, dan temperatur diukur langsung di lokasi (*in-situ*) menggunakan *multimeter* yang telah dikalibrasi sebelum *sampling*, karena parameter tersebut mudah berubah akibat pelepasan gas, oksidasi, atau perubahan suhu. Tekanan kepala sumur dan karakteristik *sampling* juga dicatat. Prinsip utama sampling adalah menjaga representativitas sampel, menghindari kontaminasi, dan mempertahankan kondisi kimia sedekat mungkin dengan kondisi awal fluida [16].

B. Data Kimia *Brine*

Komposisi kimia *brine* yang digunakan dalam pemodelan ditampilkan pada Tabel 1. Data menunjukkan bahwa fluida memiliki pH 6,53 pada temperatur 25°C. Ion dominan adalah Cl sebesar 14.829 ppm, Na sebesar 7.233 ppm, dan K sebesar 2.074 ppm. Kandungan Si sebesar 893 ppm menunjukkan bahwa fluida memiliki konsentrasi silika yang tinggi, sehingga potensi pembentukan *scale* silika perlu dievaluasi secara khusus.

Tabel 1. Komposisi Kimia *Brine* Sumur-X Lapangan-Y

Parameter	Nilai	Satuan
Temperatur	25	°C
pH	6,53	-
Cl	14.829	ppm
Na	7.233	ppm
K	2.074	ppm
Ca	144,7	ppm
Fe	1,707	ppm
Li	40,39	ppm
Mg	0,127	ppm
Si	893	ppm
Alkalinitas sebagai HCO_3^-	59,72	ppm

C. Pemodelan Geokimia PHREEQC

Pemodelan dilakukan menggunakan PHREEQC *Interactive* versi 3.8.6 dengan basis data *phreeqc.dat* [6]. Data input dimasukkan dalam blok *SOLUTION* dengan satuan ppm. Parameter yang dihitung meliputi pH, temperatur, kekuatan ionik, distribusi spesies terlarut, serta indeks saturasi mineral. Mineral target dipilih berdasarkan kemungkinan pembentukan *scale* pada *brine*, yaitu kelompok silika, karbonat, halida, dan besi.

Pemodelan dilakukan pada temperatur 25°C, yaitu temperatur sampel saat pengukuran pH. Dengan demikian, hasil penelitian ini merepresentasikan kondisi permukaan sebagai kondisi

acuan (*baseline*) dan belum mewakili kondisi reservoir maupun produksi, di mana temperatur dan tekanan yang lebih tinggi dapat mengubah kelarutan mineral, terutama silika. Skenario temperatur operasi (misalnya 25, 50, 100, dan 150°C) perlu dimodelkan pada penelitian lanjutan.

Besi dimasukkan sebagai total Fe tanpa spesiasi redoks eksplisit. Potensial redoks memang diukur *in-situ* saat *sampling*, tetapi nilainya tidak dimasukkan ke input dan oksigen terlarut tidak diukur, sehingga PHREEQC menggunakan nilai *default* (pe = 4). Akibatnya, distribusi Fe^{2+}/Fe^{3+} dan nilai SI $Fe(OH)_3(a)$ bergantung pada asumsi redoks tersebut [4]. Hasil untuk $Fe(OH)_3(a)$ karena itu dinyatakan sebagai indikasi awal dan perlu diverifikasi dengan memasukkan nilai redoks *in-situ* serta pengukuran oksigen terlarut.

Pemodelan bersifat kesetimbangan (*equilibrium*), sehingga kinetika pembentukan mineral belum dimodelkan. Keterbatasan ini terutama penting untuk silika karena pengendapan kuarsa berlangsung jauh lebih lambat dibandingkan silika amorf [17].

Analisis laboratorium untuk sampel kation yang disaring dan diasamkan dilakukan menggunakan *Inductively Coupled Plasma–Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES) untuk Na, K, Ca, Mg, dan Li, sedangkan analisis anion dilakukan dengan kromatografi ion untuk Cl [13], [14]. Prosedur analisis yang sama juga mencakup B, SO_4, F, dan NO_3, tetapi parameter tersebut tidak dimasukkan ke dalam input PHREEQC. Limit deteksi dan ketidakpastian analitik tidak dilaporkan pada data yang digunakan.

Data input PHREEQC yang digunakan dirangkum pada Tabel 2. Input terdiri atas blok *SOLUTION* yang memuat temperatur, pH, satuan konsentrasi, konsentrasi unsur, dan alkalinitas, serta blok *SELECTED_OUTPUT* yang mengatur keluaran temperatur, pH, kekuatan ionik, dan indeks saturasi mineral target. Input diakhiri dengan perintah *END*.

Tabel 2. Data Input PHREEQC

Blok	Keyword	Nilai Input
SOLUTION 1	title	Brine – September
	temp	25°C
	pH	6.53
	units	ppm
	Cl, Na, K	14829; 7233; 2074
	Ca, Fe, Li	144.7; 1.707; 40.39
	Mg, Si	0.127; 893
	Alkalinity	59.72 as HCO_3
SELECTED_OUTPUT	reset	false
	temperature, ph, ionic_strength	true
	Si dan indeks saturasi mineral	Si, Quartz, Chalcedony, $SiO_2(a)$, Calcite, Aragonite, Dolomite, Halite, Sylvite, Siderite, $Fe(OH)_3(a)$

D. Interpretasi *Saturation Index*

Indeks saturasi dihitung berdasarkan hubungan antara ion *activity product* dan konstanta kesetimbangan mineral. Nilai SI < 0 menunjukkan kondisi undersaturasi, SI ≈ 0 menunjukkan kesetimbangan, dan SI > 0 menunjukkan supersaturasi [6]. Mineral dengan nilai SI positif dianggap memiliki kecenderungan untuk mengendap, sedangkan mineral dengan nilai SI negatif dianggap belum mencapai kondisi jenuh pada kondisi simulasi.

3. PEMBAHASAN

A. Karakteristik Hidrokimia *Brine*

Hasil pemodelan PHREEQC menunjukkan bahwa *brine* Sumur-X Lapangan-Y memiliki konduktivitas spesifik sebesar 40.375 µS/cm pada 25°C. Densitas fluida sebesar 1,01431 g/cm³, viskositas 0,91820 mPa·s, aktivitas air 0,986, dan kekuatan ionik 0,414 mol/kgw. Nilai tersebut menunjukkan bahwa fluida merupakan *brine* dengan salinitas tinggi.

Dominasi ion Cl, Na, dan K menunjukkan karakter fluida Na-K-Cl. Konsentrasi Cl sebesar 14.829 ppm menjadi indikator kuat bahwa larutan memiliki kandungan garam terlarut tinggi. Namun, hasil indeks saturasi menunjukkan bahwa tingginya Na, K, dan Cl belum menyebabkan larutan jenuh terhadap mineral halida seperti halit dan silvit. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi risiko *scale* tidak dapat hanya didasarkan pada konsentrasi ion, tetapi perlu mempertimbangkan aktivitas ion dan kesetimbangan mineral [4], [6].

Electrical balance hasil simulasi menunjukkan nilai -4,81%. Nilai ini dihitung sebagai *charge balance error* (CBE) menggunakan Pers. (1).

$$\mathrm{CBE} = \frac{\Sigma\text{kation} - \Sigma\text{anion}}{\Sigma\text{kation} + \Sigma\text{anion}} \times 100\% \quad (1)$$

Σkation dan Σanion masing-masing menyatakan jumlah ekuivalen kation dan anion terlarut dalam meq/kg. Berdasarkan data pada Tabel 1 (ppm diasumsikan setara dengan mg/kg dan Fe dianggap sebagai Fe^{2+}), Σkation = 380,78 meq/kg (Na^+ 314,62; K^+ 53,05; Ca^{2+} 7,22; Li^+ 5,82; Fe^{2+} 0,06; Mg^{2+} 0,01) dan Σanion = 419,25 meq/kg (Cl^- 418,27; HCO_3^- 0,98), sehingga CBE = -4,81%. Nilai ini masih berada dalam batas umum ±5% sehingga dapat digunakan untuk interpretasi awal, tetapi berada dekat dengan batas tersebut. Nilai negatif menunjukkan bahwa anion ekuivalen sedikit lebih dominan dibandingkan kation. Ion yang disertakan dalam input hanyalah Na, K, Ca, Mg, Fe, Li, Cl, dan alkalinitas; kation minor seperti Ba, Sr, dan Mn serta anion minor (SO_4, F, NO_3) dan B tidak dimasukkan, sehingga pengaruhnya terhadap keseimbangan muatan perlu dievaluasi pada penelitian lanjutan. Ketidakseimbangan ini juga dapat dipengaruhi oleh variasi analisis laboratorium atau perubahan komposisi sampel selama penanganan.

B. Distribusi Spesies Terlarut

Distribusi spesies menunjukkan bahwa klorida dominan sebagai Cl^- dengan molalitas $4{,}291 \times 10^{-1}$ mol/kgw. Natrium dominan sebagai Na^+ sebesar $3{,}227 \times 10^{-1}$ mol/kgw, sedangkan kalium dominan sebagai K^+ sebesar $5{,}441 \times 10^{-2}$ mol/kgw. Spesies ini mengontrol karakter salinitas fluida.

Kalsium hadir terutama sebagai Ca^{2+} sebesar $3{,}700 \times 10^{-3}$ mol/kgw. Karbon anorganik terutama berada dalam bentuk HCO_3^- sebesar $8{,}742 \times 10^{-4}$ mol/kgw dan CO_2 terlarut sebesar $3{,}882 \times 10^{-4}$ mol/kgw. Pada pH 6,53, dominasi HCO_3^- dibandingkan dengan CO_3^{2-} menunjukkan bahwa sistem karbonat belum berada pada kondisi yang kuat untuk mengendapkan karbonat. Secara kuantitatif, konsentrasi Ca^{2+} ($3{,}700 \times 10^{-3}$ mol/kgw) jauh lebih kecil dibandingkan dengan Na^+ ($3{,}227 \times 10^{-1}$ mol/kgw), dan alkalinitas hanya 59,72 ppm sebagai HCO_3^- pada pH 6,53. Selain itu, kekuatan ionik yang tinggi (0,414 mol/kgw) menurunkan koefisien aktivitas ion, sehingga aktivitas Ca^{2+} dan CO_3^{2-} lebih rendah daripada konsentrasinya. Kombinasi faktor tersebut membuat produk aktivitas ion kalsit berada di bawah konstanta kelarutannya (SI kalsit -1,53).

Besi terlarut dominan sebagai Fe^{2+} sebesar $2{,}667 \times 10^{-5}$ mol/kgw. Keberadaan Fe^{2+} penting karena dapat teroksidasi menjadi Fe^{3+} ketika kontak dengan oksigen, kemudian membentuk endapan hidroksida besi. Kondisi ini relevan dengan hasil SI $Fe(OH)_3(a)$ yang positif. Namun, karena Fe dimasukkan sebagai total Fe dan nilai pe maupun oksigen terlarut tidak ditetapkan,

nilai SI $Fe(OH)_3(a)$ bergantung pada asumsi redoks dan perlu dipandang sebagai indikasi awal. Dalam sistem produksi panas bumi, endapan besi dapat memperburuk efisiensi pemisahan fluida dan meningkatkan risiko deposit campuran [18], [19].

Silika terlarut dominan sebagai H_4SiO_4 sebesar $1{,}524 \times 10^{-2}$ mol/kgw. Nilai ini menunjukkan bahwa silika merupakan komponen penting dalam *brine*. Pada sistem panas bumi, silika sering menjadi salah satu penyebab utama *scaling*, terutama ketika terjadi penurunan temperatur, perubahan tekanan, atau perubahan pH selama fluida bergerak dari *reservoir* menuju permukaan [7], [8].

C. Hasil Indeks Saturasi Mineral

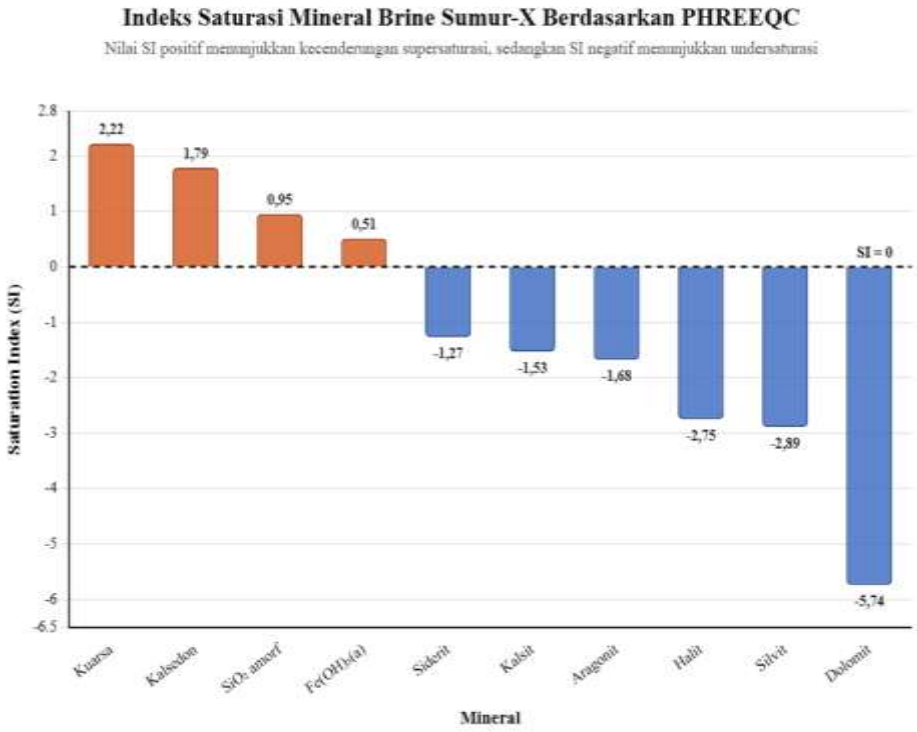
Hasil indeks saturasi mineral ditampilkan pada Tabel 3 dan divisualisasikan pada Gambar 1. Mineral dengan nilai SI positif menunjukkan kecenderungan supersaturasi, sedangkan mineral dengan SI negatif menunjukkan undersaturasi.

Tabel 3. Indeks Saturasi Mineral Hasil Simulasi PHREEQC

Mineral	Kelompok Mineral	SI	Interpretasi
Kuarsa	Silika	2,22	Supersaturasi kuat
Kalsedon	Silika	1,79	Supersaturasi
SiO_2 amorf	Silika	0,95	Supersaturasi
$Fe(OH)_3(a)$	Besi hidroksida	0,51	Supersaturasi ringan
Siderit	Besi karbonat	-1,27	Undersaturasi
Kalsit	Karbonat	-1,53	Undersaturasi
Aragonit	Karbonat	-1,68	Undersaturasi
Halit	Halida	-2,75	Undersaturasi
Silvit	Halida	-2,89	Undersaturasi
Dolomit	Karbonat	-5,74	Undersaturasi kuat

Interpretasi Gambar 1 menunjukkan bahwa mineral silika merupakan kelompok mineral paling dominan mengalami supersaturasi. Kuarsa memiliki SI tertinggi sebesar 2,22, diikuti kalsedon sebesar 1,79 dan SiO_2 amorf sebesar 0,95. Nilai ini menunjukkan bahwa brine memiliki kecenderungan kuat terhadap pembentukan scale silika.

Meskipun kuarsa memiliki SI paling tinggi, pembentukan kuarsa kristalin pada sistem produksi tidak selalu terjadi secara langsung karena faktor kinetika. Pada banyak sistem fluida panas bumi, endapan awal silika lebih sering hadir sebagai silika amorf atau bentuk polimer silika sebelum mengalami perubahan struktur lebih lanjut [20]. Kelarutan silika amorf menurun seiring penurunan temperatur [21], sedangkan laju pengendapan kuarsa jauh lebih lambat dibandingkan silika amorf [17]. Oleh karena itu, nilai SI positif pada SiO_2 amorf menjadi indikator yang lebih relevan untuk risiko operasional, sedangkan SI kuarsa yang tinggi lebih tepat dibaca sebagai kekuatan pendorong termodinamika, bukan sebagai prediksi fase yang akan terbentuk.



Gambar 1. Indeks Saturasi Mineral *Brine* Sumur-X Berdasarkan Hasil Pemodelan PHREEQC

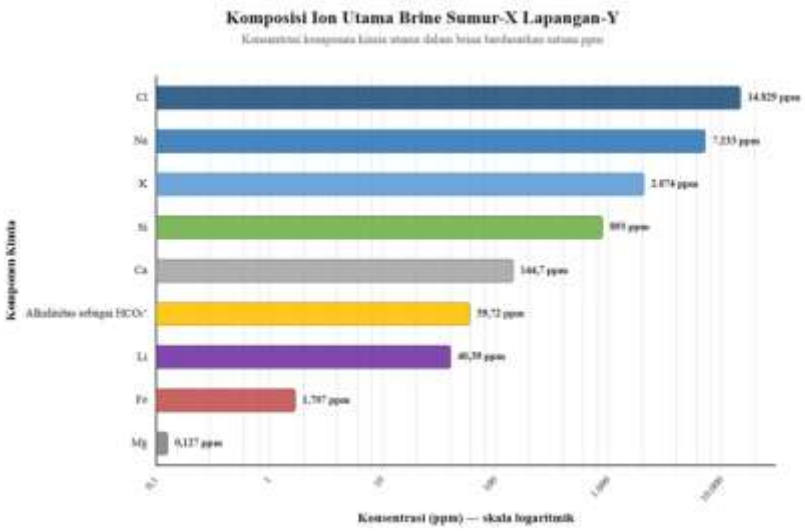
$Fe(OH)_3(a)$ memiliki SI 0,51 sehingga mengindikasikan potensi awal pembentukan endapan hidroksida besi. Nilai ini sangat bergantung pada kondisi redoks (Fe^{2+}/Fe^{3+}, pe, dan oksigen terlarut) yang tidak ditetapkan dalam pemodelan (nilai redoks *in-situ* belum dimasukkan dan oksigen terlarut tidak diukur), sehingga klaim supersaturasi besi dinyatakan sebagai indikasi awal. Risiko ini meningkat apabila fluida mengalami kontak dengan oksigen, perubahan pH, atau korosi pada fasilitas produksi. Dalam praktik lapangan, endapan besi dapat berasosiasi dengan silika dan membentuk deposit campuran yang lebih sulit dihilangkan dibandingkan *scale* karbonat biasa [11].

Mineral karbonat seperti kalsit, aragonit, dan dolomit menunjukkan nilai SI negatif. Kalsit memiliki SI -1,53, aragonit -1,68, dan dolomit -5,74. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi pH 6,53 dan temperatur 25°C, *brine* tidak memiliki kecenderungan utama untuk membentuk *scale* karbonat. Penyebabnya adalah alkalinitas yang rendah dan konsentrasi Ca^{2+} yang relatif kecil pada pH 6,53, ditambah pengaruh kekuatan ionik terhadap aktivitas ion, sebagaimana diuraikan pada subbab distribusi spesies terlarut. Hal ini berbeda dengan beberapa sistem produksi yang mengalami peningkatan pH atau pelepasan CO_2 signifikan, di mana karbonat dapat menjadi *scale* dominan [1], [2]. Kesimpulan ini berlaku pada kondisi pemodelan 25°C dan perlu dievaluasi ulang pada temperatur dan tekanan operasi.

Halit dan silvit juga menunjukkan SI negatif, masing-masing -2,75 dan -2,89. Walaupun konsentrasi Na, K, dan Cl cukup tinggi, larutan belum mencapai kondisi jenuh terhadap garam halida. Dengan demikian, pengendapan halit dan silvit tidak menjadi prioritas utama pada kondisi simulasi ini.

D. Grafik Perbandingan Ion Dominan

Selain indeks saturasi, distribusi konsentrasi ion utama juga penting untuk memahami karakter *brine*. Gambar 2 memperlihatkan dominasi Cl, Na, dan K dibandingkan ion lainnya.



Gambar 2. Komposisi Ion Utama *Brine* Sumur-X Lapangan-Y

Gambar 2 menunjukkan bahwa Cl merupakan ion dengan konsentrasi paling tinggi, diikuti oleh Na dan K. Komposisi ini memperkuat interpretasi bahwa sampel merupakan *brine* dengan karakter salinitas tinggi. Namun, konsentrasi silika yang mencapai 893 ppm juga sangat signifikan karena berkorelasi dengan hasil SI positif pada mineral silika. Dengan kata lain, risiko *scale* pada sistem ini tidak hanya ditentukan oleh salinitas, tetapi juga oleh tingginya kandungan Si terlarut. Dominasi silika ini sejalan dengan pola yang dilaporkan pada sumur panas bumi lain [7], [8]. Perbedaannya, penelitian terdahulu menekankan pola aliran dan zona *scaling* pada kondisi sumur, sedangkan penelitian ini mengidentifikasi mineral dominan dari kimia *brine* pada temperatur 25°C sebagai dasar awal penentuan prioritas mitigasi.

E. Implikasi Teknis terhadap Mitigasi *Scale*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mitigasi *scale* pada Sumur-X Lapangan-Y sebaiknya difokuskan pada pengendalian silika dan besi. Pada kondisi pemodelan 25°C, nilai SI karbonat yang negatif menunjukkan bahwa pengendapan karbonat bukan prioritas, tetapi kondisi ini perlu dievaluasi ulang apabila temperatur, tekanan, atau pH berubah [1], [2]. Oleh karena itu, diperlukan strategi yang mempertimbangkan stabilitas silika, kontrol pH, pengendalian temperatur, pengendalian oksigen, serta pemantauan korosi.

Pada risiko silika, beberapa langkah awal yang dapat dilakukan adalah menghindari perubahan pH ekstrem, mengontrol laju pendinginan fluida, dan mengevaluasi penggunaan inhibitor khusus silika. Pada sistem panas bumi, perubahan tekanan dan temperatur dapat mengubah kelarutan silika sehingga mempercepat pengendapan [3], [7], [8]. Oleh karena itu, pemodelan lanjutan pada berbagai temperatur dan tekanan perlu dilakukan agar zona kritis *scaling* dapat diprediksi lebih akurat.

Untuk risiko besi, kontrol oksigen terlarut dan korosi menjadi faktor penting. Kontak fluida dengan oksigen dapat mempercepat pembentukan $Fe(OH)_3(a)$. Selain itu, korosi pipa dapat menambah Fe terlarut dalam sistem, sehingga meningkatkan potensi deposit besi. Apabila endapan besi bercampur dengan silika, maka *treatment* mekanik atau kimia dapat menjadi lebih sulit dan mahal [9], [11].

F. Keterbatasan dan Penelitian Lanjutan

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, pemodelan hanya dilakukan pada temperatur 25°C sehingga belum mewakili kondisi reservoir dan produksi, serta belum ada analisis sensitivitas terhadap temperatur dan tekanan. Kedua, nilai SI $Fe(OH)_3(a)$ bergantung

pada asumsi redoks (Fe^{2+}/Fe^{3+}, pe, dan oksigen terlarut) yang belum diverifikasi. Ketiga, pemodelan bersifat kesetimbangan sehingga kinetika pembentukan mineral, terutama silika, belum dimodelkan. Keempat, hasil belum divalidasi dengan data lapangan, analisis deposit, atau perangkat pemodelan lain, keseimbangan muatan (-4,81%) masih dapat diperbaiki dengan menambahkan ion minor, serta limit deteksi dan ketidakpastian analitik tidak dilaporkan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini sebaiknya dipandang sebagai evaluasi awal prioritas mitigasi. Penelitian lanjutan dapat mencakup simulasi pada variasi temperatur dan tekanan operasi (misalnya 25, 50, 100, dan 150°C), pemodelan pencampuran fluida, serta validasi menggunakan analisis deposit dan data lapangan.

4. SIMPULAN

Berdasarkan pemodelan PHREEQC terhadap *brine* Sumur-X Lapangan-Y, fluida memiliki karakter salinitas tinggi dengan pH 6,53, konduktivitas spesifik 40.375 µS/cm, densitas 1,01431 g/cm³, dan kekuatan ionik 0,414 mol/kgw. Komposisi kimia didominasi oleh Cl, Na, dan K, dengan kandungan silika yang signifikan sebesar 893 ppm.

Hasil indeks saturasi menunjukkan bahwa mineral silika merupakan kandidat utama pembentuk *scale*. Kuarsa memiliki SI 2,22, kalsedon 1,79, dan SiO_2 amorf 0,95. Selain itu, $Fe(OH)_3(a)$ memiliki SI 0,51 yang menunjukkan indikasi awal potensi pembentukan endapan hidroksida besi, dengan catatan bahwa nilai ini bergantung pada kondisi redoks.

Mineral karbonat seperti kalsit, aragonit, dolomit, dan siderit berada dalam kondisi undersaturasi. Halit dan silvit juga belum menunjukkan kecenderungan mengendap. Dengan demikian, pada kondisi pemodelan 25°C, risiko *scale* utama pada *brine* ini bukan karbonat atau halida, melainkan silika dan besi.

Rekomendasi teknis dari penelitian ini adalah perlunya monitoring rutin terhadap Si, Fe, pH, temperatur, alkalinitas, oksigen terlarut, dan padatan tersuspensi. Selain itu, perlu dilakukan simulasi lanjutan pada variasi temperatur, tekanan, dan skenario pencampuran fluida untuk menentukan zona kritis pembentukan *scale* secara lebih akurat, serta verifikasi spesiasi redoks besi (termasuk pemanfaatan nilai redoks *in-situ*) dan validasi dengan analisis deposit atau data lapangan.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] H. H. Moghadasi, M. Jamialahmadi, H. Müller-Steinhagen, and A. Sharif, "Scale formation in Iranian oil reservoir and production equipment during water injection," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 43, no. 3–4, pp. 201–217, 2004.

[2] J. E. Oddo and M. B. Tomson, "Why scale forms in the oil field and methods to predict it," *SPE Production & Facilities*, vol. 9, no. 1, pp. 47–54, 1994.

[3] 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.

[4] W. Stumm and J. J. Morgan, *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, 3rd ed. New York: Wiley, 1996.

[5] C. A. J. Appelo and D. Postma, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed. Leiden: CRC Press/Balkema, 2005.

[6] D. L. Parkhurst and C. A. J. Appelo, *Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3: A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2013.

[7] 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," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 14, no. 1, pp. 192–202, 2024.

[8] 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.
[9] 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.
[10] A. Sofyan, *Scale Formation and Treatment Plan in Indonesian Geothermal Wells*, Doctoral dissertation, University of Szeged, 2025.
[11] M. Crabtree, D. Eslinger, P. Fletcher, M. Miller, A. Johnson, and G. King, "Fighting scale—Removal and prevention," *Oilfield Review*, vol. 11, no. 3, pp. 30–45, 1999.
[12] M. A. Kelland, *Production Chemicals for the Oil and Gas Industry*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
[13] *Standard Practice for Sampling Two-Phase Geothermal Fluid for Purposes of Chemical Analysis*, ASTM E1675, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
[14] K. Nicholson, *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993.
[15] American Public Health Association, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed. Washington, DC: APHA, 2017.
[16] U.S. Environmental Protection Agency, *Quick Guide to Drinking Water Sample Collection*, 2nd ed. Washington, DC: U.S. EPA, 2016.
[17] J. D. Rimstidt and H. L. Barnes, "The kinetics of silica-water reactions," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 44, no. 11, pp. 1683–1699, 1980.
[18] 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*, 2020, pp. 1–15.
[19] 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.
[20] R. K. Iler, *The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*. New York: Wiley, 1979.
[21] I. Gunnarsson and S. Arnórsson, "Amorphous silica solubility and the thermodynamic properties of H_4SiO_4° in the range of 0° to 350°C at Psat," *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 64, no. 13, pp. 2295–2307, 2000.