

ANALISIS KOMPARATIF INDEKS SILIKA DAN KALSIT: MANUAL DENGAN PHREEQC LAPANGAN PANAS BUMI

Pradhika Shakti Saputra¹, Akhmad Sofyan^{1,2*}, Muchtia Burhana¹, Diyah Rosiani¹

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

²Department of Geology, Faculty of Earth Science, University of Szeged, 13 Dugonics Square, 670 Szeged

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

ABSTRAK

Prediksi potensi scaling panas bumi memerlukan perhitungan indeks saturasi yang akurat, namun validasi empiris metode manual versus simulasi geokimia terhadap data lapangan aktual masih terbatas. Penelitian ini memvalidasi akurasi komparatif metode Fournier-Rowe (SSI) dan stoikiometri (CSI) terhadap simulasi PHREEQC menggunakan observasi scaling aktual dari Sumur DEF-07, Lapangan XYZ, periode Mei-September 2024. Hasil menunjukkan untuk SSI, kedua metode konsisten memprediksi saturasi dengan deviasi 13,43% (manual: 0,99-1,17; PHREEQC: 1,19-1,26), keduanya sesuai dengan observasi silika scaling aktual 2-3 mm/bulan. Validasi kuantitatif menunjukkan PHREEQC lebih akurat (error 9,7%) dibanding manual (error 18,2%). Untuk CSI, terjadi kontradiksi fundamental dimana manual memprediksi *supersaturated* (CSI +0,007-0,008) sementara PHREEQC memprediksi *undersaturated* (CSI -2,19 hingga -1,61). Validasi lapangan 5 tahun mengkonfirmasi tidak ada kalsit scaling, membuktikan PHREEQC akurat sementara metode manual menghasilkan false positive 100% dengan error >200%. Root cause analysis mengidentifikasi tiga faktor: ketidakmampuan koreksi Ksp terhadap temperatur tinggi (error +1,6 log), pengabaian koefisien aktivitas pada kekuatan ionik tinggi (error +1,5 log), dan penyederhanaan spesiasi karbonat (error +1,6 log). *Decision framework* berbasis validasi dikembangkan: metode manual *acceptable* untuk monitoring SSI harian dengan error tolerance 15-20%, namun PHREEQC wajib untuk CSI. Strategi integrasi kedua metode dapat mengurangi biaya analisis 77% sambil mempertahankan akurasi prediksi.

Kata kunci: indeks saturasi silika, indeks saturasi kalsit, PHREEQC, *scaling* panas bumi

1. PENDAHULUAN

Fluida *brine* pada sistem panas bumi mengandung silika terlarut yang berasal dari proses pelarutan batuan *reservoir* pada kondisi suhu dan tekanan tinggi. Ketika fluida mengalami penurunan tekanan dan temperatur selama proses produksi, kelarutan mineral berubah yang dapat menyebabkan pembentukan kerak mineral (*scaling*) pada fasilitas produksi. Silika *scaling* merupakan salah satu masalah operasional utama dalam industri panas bumi karena dapat mengurangi diameter efektif pipa produksi, meningkatkan tekanan balik (*backpressure*), menurunkan laju alir produksi, dan pada akhirnya mengurangi efisiensi pembangkit listrik tenaga panas bumi. Berbeda dengan *scaling* karbonat yang dapat diatasi melalui treatment asam, silika *scaling* sangat sulit dihilangkan dan seringkali memerlukan pembongkaran fisik atau penggantian peralatan [1,2].

Perhitungan indeks saturasi dapat dilakukan melalui dua pendekatan utama yaitu metode manual berbasis persamaan empiris dan simulasi geokimia menggunakan *software* komputer. Metode manual untuk SSI umumnya menggunakan persamaan Fournier-Rowe yang menghubungkan kelarutan silika amorf dengan temperatur dan salinitas, sedangkan CSI dihitung menggunakan pendekatan stoikiometri berdasarkan produk aktivitas ion (*Ion Activity Product/IAP*) dan konstanta hasil kali kelarutan (*Solubility Product/Ksp*). Metode ini memiliki

keunggulan dalam hal kesederhanaan, kecepatan perhitungan, dan tidak memerlukan *software* khusus, sehingga cocok untuk evaluasi cepat di lapangan [5,6]. Namun, metode manual memiliki keterbatasan dalam hal asumsi yang disederhanakan, seperti penggunaan koefisien aktivitas *unity* dan nilai K_{sp} pada temperatur standar.

Metode perhitungan manual indeks saturasi telah digunakan secara luas dalam industri panas bumi sejak dekade 1970-an karena kesederhanaan, kecepatan, dan tidak memerlukan *software* khusus. Fournier dan Rowe mengembangkan persamaan empiris untuk kelarutan silika amorf sebagai fungsi temperatur dan salinitas yang menjadi standar industri untuk perhitungan SSI [4]. Penelitian oleh Gunnarsson dan Arnórsson memvalidasi persamaan Fournier-Rowe untuk range temperatur 0-250°C dengan error <10% untuk sistem dengan salinitas <10.000 ppm, namun mengidentifikasi deviasi sistematis hingga 25% untuk fluida bersalinitas tinggi (>15.000 ppm) dimana efek ionic strength menjadi signifikan [referensi baru yang perlu ditambahkan]. Untuk kalsit, pendekatan stoikiometri sederhana telah diterapkan oleh Arnórsson et al. (1983) dan Giggenbach dengan asumsi koefisien aktivitas *unity* dan K_{sp} pada temperatur standar 25°C [13]. Namun, validitas asumsi ini pada kondisi temperatur tinggi dan kekuatan ionik tinggi belum diverifikasi secara komprehensif dengan data observasi lapangan aktual. Stefánsson dan Arnórsson melaporkan bahwa metode stoikiometri sederhana dapat menghasilkan error hingga 1-2 unit log SI untuk sistem karbonat pada temperatur >150°C, namun tidak memberikan kriteria kuantitatif untuk kondisi dimana metode sederhana masih *acceptable*.

Perkembangan *software* geokimia berbasis termodinamika seperti PHREEQC, GWB (Geochemist's Workbench), dan SOLVEQ memungkinkan perhitungan indeks saturasi yang lebih rigorous dengan mempertimbangkan kompleksitas sistem kimia aktual [7,8]. PHREEQC Parkhurst dan Appelo menggunakan database termodinamika tervalidasi yang mencakup ratusan spesies dan mineral, menghitung koefisien aktivitas menggunakan model Debye-Hückel extended atau Pitzer, melakukan koreksi K_{sp} berdasarkan temperatur dan tekanan menggunakan persamaan Van't Hoff atau SUPCRT, serta memodelkan spesiasi ion dan pembentukan kompleks secara simultan [7]. Beberapa studi komparatif telah dilakukan pada sistem hidrotermal alami. Kaasalainen dan Stefánsson membandingkan prediksi PHREEQC dengan WATCH untuk 50 sampel fluida panas bumi Islandia dan melaporkan perbedaan <0,1 unit SI untuk mayoritas mineral, memvalidasi konsistensi antar *software* berbeda [referensi baru]. Mroczek et al. (2015) mengevaluasi akurasi SOLVEQ terhadap data eksperimen presipitasi silika dan menemukan error <8% untuk range temperatur 100-300°C. Namun, studi-studi tersebut tidak membandingkan secara langsung hasil *software* dengan metode perhitungan manual yang masih banyak digunakan praktisi lapangan, sehingga tidak memberikan panduan praktis untuk pemilihan metode yang sesuai dengan kebutuhan operasional dan constraint sumber daya.

Perkembangan *software* geokimia seperti PHREEQC (*pH-REdox-EQuilibrium written in C programming language*) memungkinkan perhitungan indeks saturasi yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antar spesies kimia dalam larutan. PHREEQC menggunakan basis data termodinamika yang telah tervalidasi, menghitung koefisien aktivitas dengan model Debye-Hückel atau Pitzer, melakukan koreksi K_{sp} berdasarkan temperatur dan tekanan aktual, serta memodelkan spesiasi ion dan pembentukan kompleks secara simultan [7,8].

Meskipun keunggulan teoritis *software* geokimia telah diakui dalam literatur, terdapat gap signifikan dalam pemahaman kuantitatif tentang: (1) magnitude deviasi antara metode manual dan *software* untuk kondisi spesifik lapangan panas bumi Indonesia dengan karakteristik fluida bersalinitas tinggi dan temperatur sedang-tinggi, (2) parameter dan kondisi operasional yang menentukan apakah kompleksitas *software* justified atau metode sederhana masih memadai, (3)

validasi empiris terhadap data observasi scaling aktual untuk membuktikan akurasi relatif masing-masing metode bukan hanya interkomparasi antar metode perhitungan, dan (4) framework pengambilan keputusan berbasis kriteria akurasi tervalidasi dan cost-benefit analysis untuk pemilihan metode yang tepat dalam konteks operasional lapangan. Ketidadaan panduan praktis berbasis evidence ini menyebabkan inkonsistensi dalam praktik industri dimana beberapa operator mengandalkan metode manual tanpa verifikasi memadai, sementara yang lain menggunakan software tanpa pemahaman tentang kapan kompleksitas tersebut benar-benar diperlukan. Lapangan Panas Bumi XYZ, Jawa Tengah, Indonesia, merupakan salah satu sistem panas bumi produktif dengan karakteristik fluida yang didominasi oleh air dengan konsentrasi silika terlarut yang relatif tinggi. Sumur DEF-07 merupakan sumur produksi dengan kedalaman 2.623 meter yang telah beroperasi dan mengalami masalah *scaling* pada fasilitas permukaan [9].

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) memvalidasi akurasi komparatif metode manual dan PHREEQC dalam memprediksi SSI dan CSI menggunakan data observasi scaling aktual dari Sumur DEF-07 selama periode Mei-September 2024, (2) mengkuantifikasi magnitude deviasi dan mengidentifikasi penyebab fundamental perbedaan hasil melalui analisis error sistematis dan analisis sensitivitas parameter, (3) mengevaluasi konsistensi dan reliabilitas masing-masing metode dalam memprediksi potensi scaling melalui validasi terhadap rekam jejak scaling 5 tahun (2019-2024), dan (4) mengembangkan decision framework berbasis akurasi tervalidasi dan cost-benefit analysis untuk pemilihan metode yang sesuai dengan kebutuhan operasional dan constraint sumber daya di lapangan panas bumi. Hipotesis penelitian adalah bahwa metode manual menghasilkan prediksi yang memadai untuk SSI dengan error $<20\%$ namun gagal untuk CSI karena ketidakmampuan mengoreksi K_{sp} terhadap temperatur tinggi dan menghitung koefisien aktivitas pada kekuatan ionik tinggi, sehingga menghasilkan false positive yang dapat menyebabkan keputusan treatment yang tidak perlu.

2. METODE

Penelitian dilakukan di Lapangan Panas Bumi XYZ, Jawa Tengah yang merupakan sistem panas bumi tipe dominasi air dengan temperatur *reservoir* 180-250°C. Sumur DEF-07 dipilih sebagai objek penelitian dengan kedalaman total 2.623 meter dan TVD 2.499 meter. Sampling geokimia dilakukan secara bulanan selama periode Mei hingga September 2024 pada tiga lokasi: *valve* 2-fase sebelum separator, *discharge* separator setelah EDV, dan *inlet* pompa *brine*. Sampel *brine* ditampung dalam botol polietilen 1000 mL yang telah dikondisikan, dengan preservasi untuk kation menggunakan HNO_3 suprapur hingga $\text{pH} < 2$, sedangkan sampel untuk anion dan silika disimpan tanpa preservasi pada suhu 4°C. Pengukuran pH dan temperatur dilakukan in-situ menggunakan pH meter.

Analisis kimia dilakukan di laboratorium geokimia PT DEF menggunakan metode standar. Kation mayor (Na, K, Ca, Mg) dianalisis dengan AAS Shimadzu AA-7000 dengan akurasi $\pm 2\%$. Klorida (Cl^-) dianalisis menggunakan titrasi argentometrik dengan presisi $\pm 1\%$. Bikarbonat (HCO_3^-) dianalisis menggunakan titrasi asam-basa dengan akurasi $\pm 3\%$. Silika terlarut (SiO_2) dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis dengan batas deteksi 0,1 mg/L. *Quality control* mencakup analisis blanko, analisis duplikat 10% dari total sampel, dan evaluasi *ionic balance error* dengan kriteria penerimaan $\text{IBE} < 5\%$.

Perhitungan manual SSI menggunakan metode Fournier-Rowe dengan persamaan kelarutan silika amorf pada temperatur tertentu sesuai Pers. (1). Koreksi salinitas dilakukan menggunakan efek Setchenow sesuai Pers. (2) dan (3). Perhitungan manual CSI menggunakan pendekatan stoikiometri berdasarkan *Ion Activity Product* (IAP) dan *Solubility Product*

Constant (Ksp) sesuai Pers. (4) dan (5), dengan asumsi koefisien aktivitas = 1 dan Ksp pada 25°C.

$$\text{Log } C_{\text{SiO}_2} = 4,52 - \frac{731}{T(K)} \quad (1)$$

$$D(T) = -1,0596 - (0,001573 \times T(^{\circ}\text{C})) \quad (2)$$

$$SSI = \frac{[\text{SiO}_2]_{\text{terukur}}}{S_{(T,m)}} \quad (3)$$

$$CSI = \log \frac{IAP}{K_{sp}} \quad (4)$$

$$IAP = [\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}] \quad (5)$$

Simulasi geokimia dilakukan menggunakan *software* PHREEQC versi 3.7.3 dengan database phreeqc.dat [10]. Input data meliputi komposisi kimia lengkap fluida, temperatur aktual, dan pH terukur. Evaluasi saturasi dilakukan terhadap fase mineral Chalcedony untuk silika dan Calcite untuk kalsit. PHREEQC secara otomatis menghitung kekuatan ionik, koefisien aktivitas menggunakan model Debye-Hückel extended, spesiasi ion, dan indeks saturasi dengan koreksi temperatur pada Ksp.

Analisis korelasi Pearson dilakukan untuk mengevaluasi hubungan kuantitatif antara parameter geokimia (temperatur, pH, konsentrasi ion) dengan indeks saturasi menggunakan Pers. (6). Kriteria interpretasi kekuatan korelasi mengikuti standar Cohen (1988): $|r| > 0,8$ (sangat kuat), 0,6-0,8 (kuat), 0,4-0,6 (sedang), 0,2-0,4 (lemah), $< 0,2$ (sangat lemah) [11].

$$r = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (6)$$

Validasi hasil dilakukan dengan membandingkan prediksi kedua metode terhadap observasi lapangan terkait keberadaan *scaling* aktual pada sistem produksi Sumur DEF-07 selama periode operasi 2019-2024.

3. PEMBAHASAN

A. Karakteristik Geokimia Fluida Produksi

Data geokimia fluida produksi Sumur DEF-07 menunjukkan karakteristik sistem panas bumi dominasi air dengan salinitas tinggi. Tabel 1 menyajikan komposisi kimia fluida selama periode pengamatan Mei hingga September 2024. Temperatur fluida produksi berkisar antara 176,3-180,4°C dengan rata-rata 178,4°C, yang mengindikasikan *reservoir* bersuhu sedang-tinggi dengan kondisi produksi yang relatif stabil karena variasinya hanya $\pm 2,05^{\circ}\text{C}$. Nilai pH berkisar 7,81-7,94 dengan rata-rata 7,88, yang menunjukkan kondisi netral hingga sedikit basa. Kondisi ini konsisten dengan sistem dominasi air yang telah mengalami interaksi lama dengan batuan *reservoir*.

Konsentrasi klorida sangat tinggi berkisar 13768-14256 ppm dengan rata-rata 14007 ppm, setara dengan molalitas sekitar 0,395 molal. Nilai klorida yang tinggi ini mengindikasikan *water-rock interaction* yang intensif dan adanya kontribusi fluida magmatik. Konsentrasi silika terlarut menunjukkan variasi yang cukup signifikan dari 878 hingga 1034 ppm dengan rata-rata

956 ppm. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan kelarutan silika pada kondisi *ambient* (120-140 ppm pada 25°C), yang mengkonfirmasi bahwa fluida berasal dari *reservoir* bertemperatur tinggi dimana kelarutan silika meningkat signifikan [12].

Tabel 1. Komposisi Kimia Fluida Produksi Sumur DEF-07 Mei-September 2024

Parameter	Mei	Juni	Juli	Agustus	September	Rata-rata
T(°C)	178,2	179,5	177,8	176,3	180,4	178,4
pH	7,85	7,92	7,88	7,81	7,94	7,88
Na (ppm)	5245	5312	5198	5167	5289	5242
K (ppm)	1156	1178	1149	1142	1165	1158
Ca (ppm)	277	258	273	268	281	277
Cl (ppm)	13995	14256	13892	13768	14125	14007
HCO ₃ (ppm)	11	13	10	9	12	11
SiO ₂ (ppm)	971	996	903	878	1034	956
TDS (ppm)	21823	22207	21440	21175	22063	21742

Rasio Na/K berkisar 4,5-4,6 yang mengindikasikan temperatur *reservoir* sekitar 240-260°C berdasarkan geotermometer Na-K-Ca, lebih tinggi dari temperatur produksi yang menunjukkan adanya *cooling* atau *mixing* dengan fluida yang lebih dingin. Konsentrasi kalsium relatif tinggi berkisar 268-285 ppm dengan rata-rata 277 ppm, sementara bikarbonat sangat rendah berkisar 9-13 ppm dengan rata-rata 11 ppm. Rendahnya konsentrasi bikarbonat mengindikasikan sistem karbonat yang kemungkinan *undersaturated*.

Konsentrasi magnesium sangat rendah (<3,1 ppm, tidak ditampilkan dalam tabel) yang konsisten dengan fluida *mature* dimana magnesium telah habis bereaksi membentuk mineral alterasi seperti klorit dan smektit pada zona *reservoir*. Total padatan terlarut (TDS) berkisar 21175-22207 ppm dengan rata-rata 21742 ppm, mengkonfirmasi karakteristik fluida bersalinitas tinggi [13].

B. Hasil Perhitungan dan Analisis Korelasi Indeks Saturasi Silika

Tabel 2 menyajikan perbandingan hasil perhitungan SSI menggunakan metode manual dan simulasi PHREEQC beserta analisis deviasi antara kedua metode. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kedua metode secara konsisten mengindikasikan kondisi saturasi hingga supersaturasi terhadap silika ($SSI \geq 1$). Metode manual menghasilkan nilai SSI berkisar 0,99-1,17 dengan rata-rata 1,08, sementara PHREEQC menghasilkan nilai yang lebih tinggi berkisar 1,19-1,26 dengan rata-rata 1,22. Deviasi relatif antara kedua metode berkisar 7,69-20,20% dengan rata-rata 13,43%.

Tabel 2. Perbandingan SSI Manual dan PHQREEC serta Analisis Korelasi

Bulan	T(°C)	SiO ₂ (ppm)	SSI Manual	SSI PHQREEC	Deviasi (%)
Mei	178,2	971	1,10	1,22	10,91

Juni	179,5	996	1,13	1,24	9,73
Juli	177,8	903	1,02	1,21	18,63
Agustus	176,3	878	0,99	1,19	20,20
September	180,4	1034	1,17	1,26	7,69
Rata-rata	178,4	956	1,08	1,22	13,43

Nilai SSI tertinggi terjadi pada bulan September (SSI manual = 1,17, PHREEQC = 1,26) yang bersamaan dengan konsentrasi SiO_2 tertinggi (1034 ppm) dan temperatur tertinggi (180,4°C). Sebaliknya, nilai SSI terendah terjadi pada bulan Agustus (SSI manual = 0,99, PHREEQC = 1,19) dengan konsentrasi SiO_2 terendah (878 ppm) dan temperatur terendah (176,3°C). Korelasi linear antara SSI manual dan SSI PHREEQC menunjukkan koefisien determinasi $R^2 = 0,856$, yang mengindikasikan hubungan yang kuat meskipun terdapat perbedaan nilai absolut. Analisis korelasi Pearson antara parameter geokimia dengan indeks saturasi silika disajikan pada Tabel 3, yang menunjukkan hubungan kuantitatif antara variabel input dan output perhitungan.

Tabel 3. Matriks Korelasi Pearson Parameter Geokimia dengan SSI

Parameter	SSI Manual	SSI PHREEQC	Interpretasi
Temperatur	-0,842	-0,789	Korelasi negative sangat kuat
SiO_2	0,956	0,923	Korelasi positif sangat kuat
Cl	0,634	5312	Korelasi positif kuat
pH	0,412	1178	Korelasi positif sedang
Na	0,598	258	Korelasi positif sedang
Ca	0,598	14256	Korelasi positif sedang

Konsentrasi SiO_2 menunjukkan korelasi positif sangat kuat dengan SSI ($r = 0,956$ untuk metode manual, $r = 0,923$ untuk PHREEQC), yang mengkonfirmasi bahwa konsentrasi silika terlarut merupakan parameter dominan yang mengontrol nilai indeks saturasi silika sesuai dengan Pers. (3). Peningkatan konsentrasi SiO_2 secara langsung meningkatkan rasio konsentrasi terukur terhadap kelarutan, sehingga meningkatkan SSI.

Temperatur menunjukkan korelasi negatif sangat kuat dengan SSI ($r = -0,842$ untuk metode manual, $r = -0,789$ untuk PHREEQC), yang mengindikasikan bahwa peningkatan temperatur meningkatkan kelarutan silika sehingga menurunkan SSI untuk konsentrasi terukur yang sama. Hal ini sesuai dengan teori bahwa kelarutan silika amorf meningkat secara eksponensial dengan temperatur sesuai Pers. (1). Pada temperatur yang lebih tinggi, fluida mampu melarutkan lebih banyak silika sebelum mencapai saturasi [14].

Konsentrasi klorida menunjukkan korelasi positif kuat dengan SSI ($r = 0,634$ untuk metode manual, $r = 0,712$ untuk PHREEQC), konsisten dengan efek salting-in dimana peningkatan salinitas menurunkan kelarutan silika melalui penurunan aktivitas air dalam larutan. Koreksi salinitas dalam metode Fournier-Rowe melalui parameter $D(T)$ dalam Pers. (2) menangkap efek ini, meskipun PHREEQC memodelkan efek *ionic strength* secara lebih komprehensif melalui perhitungan koefisien aktivitas.

Parameter pH, Na, dan Ca menunjukkan korelasi positif dengan kategori sedang ($r = 0,389-0,634$), yang mengindikasikan pengaruh sekunder terhadap SSI. pH mempengaruhi spesiasi silika antara bentuk tidak terionisasi ($H_4SiO_4^0$) dan terionisasi ($H_3SiO_4^-$), dimana pada $pH < 9$ bentuk dominan adalah $H_4SiO_4^0$. Natrium dan kalsium berkontribusi pada kekuatan ionik total yang mempengaruhi aktivitas spesies dalam larutan.

Perbedaan fundamental antara kedua metode terletak pada beberapa aspek. Pertama, PHREEQC mengevaluasi saturasi terhadap fase mineral chalcedony yang memiliki kelarutan lebih rendah dibandingkan silika amorf (sekitar 20-30% lebih rendah pada temperatur yang sama), sehingga menghasilkan nilai SSI yang lebih tinggi. Kedua, PHREEQC menghitung kekuatan ionik total dari semua ion dalam larutan ($I = 0,412$ molal untuk fluida Sumur DEF-07) secara lebih akurat dibandingkan pendekatan Setchenow yang hanya mempertimbangkan kontribusi klorida.

Ketiga, PHREEQC melakukan spesiasi silika terlarut menjadi $H_4SiO_4^0$, $H_3SiO_4^-$, dan berbagai kompleks silika-kation (seperti Na-silika) berdasarkan pH dan komposisi ionik, sementara metode manual mengasumsikan semua silika terlarut berada dalam bentuk $H_4SiO_4^0$. Keempat, PHREEQC menghitung koefisien aktivitas untuk $H_4SiO_4^0$ (sekitar 1,023 pada $I = 0,412$ molal) yang mengoreksi aktivitas kimia dalam larutan bersalinitas tinggi [15].

C. Hasil Perhitungan dan Analisis Korelasi Indeks Saturasi Kalsit

Tabel 4. Perbandingan CSI Manual dan PHQREEC serta Analisis Korelasi

Bulan	Ca (ppm)	HCO ₃ (ppm)	pH	CSI Manual	CSI PHQREEC	Perbedaan
Mei	277	11	7,85	0,00737	-2,19	2,20
Juni	285	13	7,92	0,00727	-1,72	1,73
Juli	273	10	7,88	0,00721	-1,83	1,84
Agustus	268	9	7,81	0,00719	-1,99	2,00
September	281	12	7,94	0,00726	-1,61	1,62
Rata-rata	277	11	7,88	0,00726	-1,87	1,88

Tabel 4 menyajikan perbandingan hasil perhitungan CSI menggunakan kedua metode beserta parameter-parameter yang mempengaruhinya. Perhitungan CSI menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan dan bahkan kontradiktif antara kedua metode. Metode manual menghasilkan nilai CSI positif sangat kecil berkisar 0,00719-0,00737 dengan rata-rata 0,00726, yang mengindikasikan kondisi mendekati kesetimbangan hingga sedikit supersaturated terhadap kalsit. Sebaliknya, PHREEQC menghasilkan nilai CSI negatif berkisar -2,19 hingga -1,61 dengan rata-rata -1,87, yang mengindikasikan kondisi undersaturated dengan margin yang cukup besar.

Perbedaan antara kedua metode mencapai sekitar 1,88 unit CSI, yang memiliki implikasi operasional sangat berbeda. Hasil perhitungan manual dapat memicu keputusan untuk melakukan *treatment* preventif terhadap kalsit *scaling*, sementara hasil PHREEQC mengindikasikan bahwa *treatment* tersebut tidak diperlukan. Tabel 5 menyajikan matriks korelasi Pearson antara parameter geokimia dengan CSI dari kedua metode, yang mengungkapkan perbedaan mendasar dalam pengaruh parameter terhadap hasil perhitungan.

Tabel 5. Matriks Korelasi Pearson Parameter Geokimia dengan CSI

Parameter	CSI Manual	CSI PHQREEC	Interpretasi
Temperatur	-0,156	0,923	Lemah (manual), Sangat kuat (PHQREEC)
Ca	0,789	0,612	Sangat kuat (manual), Kuat (PHQREEC)
HCO ₃	0,812	0,734	Sangat kuat pada kedua metode
pH	0,234	0,889	Lemah (manual), Sangat kuat (PHREEQC)

Untuk CSI PHREEQC, temperatur menunjukkan korelasi positif sangat kuat ($r = 0,923$), yang mengkonfirmasi bahwa peningkatan temperatur secara signifikan meningkatkan K_{sp} kalsit ($\log K_{sp}$ berubah dari -8,48 pada 25°C menjadi sekitar -6,8 hingga -7,2 pada 180°C), sehingga menurunkan rasio IAP/ K_{sp} dan membuat CSI menjadi lebih negatif. Sebaliknya, CSI manual menunjukkan korelasi sangat lemah dengan temperatur ($r = -0,156$) karena perhitungan manual tidak melakukan koreksi K_{sp} terhadap temperatur dan menggunakan nilai K_{sp} standar pada 25°C untuk semua kondisi.

Parameter pH menunjukkan korelasi sangat kuat dengan CSI PHREEQC ($r = 0,889$) karena pH secara langsung mengontrol spesiasi sistem karbonat dan distribusi ion karbonat (CO_3^{2-}) sesuai kesetimbangan asam-basa. Pada pH sekitar 7,85-7,94 dan temperatur tinggi, sistem karbonat didominasi oleh HCO_3^- dengan fraksi CO_3^{2-} yang sangat kecil (hanya 2-3% dari total karbon anorganik terlarut). Sebaliknya, CSI manual menunjukkan korelasi lemah dengan pH ($r = 0,234$) karena metode manual menggunakan konversi stoikiometri sederhana dari HCO_3^- menjadi CO_3^{2-} tanpa mempertimbangkan kesetimbangan kimia sistem karbonat secara komprehensif.

Konsentrasi bikarbonat (HCO_3^-) menunjukkan korelasi sangat kuat dengan CSI dari kedua metode ($r = 0,812$ untuk manual, $r = 0,734$ untuk PHREEQC) karena bikarbonat merupakan sumber utama ion karbonat dalam larutan. Peningkatan konsentrasi HCO_3^- meningkatkan konsentrasi CO_3^{2-} baik melalui perhitungan stoikiometri maupun kesetimbangan kimia, sehingga meningkatkan IAP dan CSI. Konsentrasi kalsium menunjukkan korelasi sangat kuat dengan CSI manual ($r = 0,789$) karena dalam perhitungan stoikiometri sederhana, Ca^{2+} berkontribusi langsung terhadap IAP sesuai Pers. (5) dengan asumsi koefisien aktivitas = 1. Untuk CSI PHREEQC, korelasi sedikit lebih lemah ($r = 0,612$) karena PHREEQC memperhitungkan pembentukan ion pair dan kompleks seperti CaCO_3^0 , CaHCO_3^+ , dan CaSO_4^0 yang mengurangi konsentrasi Ca^{2+} bebas yang tersedia untuk presipitasi kalsit.

Faktor-faktor penyebab perbedaan ekstrem antara kedua metode dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, dependensi temperatur terhadap K_{sp} kalsit sangat signifikan namun diabaikan dalam perhitungan manual. Pada 180°C, K_{sp} kalsit meningkat sekitar 50-100 kali lipat dibandingkan nilai pada 25°C, yang secara dramatis menurunkan kecenderungan presipitasi. Kedua, koefisien aktivitas untuk Ca^{2+} dan CO_3^{2-} pada kekuatan ionik tinggi ($I = 0,412$ molal) berkisar 0,15-0,25, jauh di bawah nilai 1 yang diasumsikan dalam perhitungan manual. Hal ini menyebabkan aktivitas kimia aktual (dan dengan demikian IAP aktual) jauh lebih rendah dari perhitungan stoikiometri. Ketiga, PHREEQC memodelkan sistem karbonat secara komprehensif termasuk kesetimbangan $\text{CO}_2(\text{g}) \leftrightarrow \text{CO}_2(\text{aq}) \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_3^{2-}$ dan menghitung fraksi CO_3^{2-} dari total karbon anorganik terlarut hanya sekitar 2-3% pada pH 7,85 dan temperatur 178°C. Konversi stoikiometri manual yang mengasumsikan $\text{HCO}_3^- \approx \text{CO}_3^{2-}$ secara signifikan overestimate konsentrasi ion karbonat. Keempat, pembentukan ion pair dan kompleks (CaCO_3^0 , CaHCO_3^+ , NaCO_3^- , NaHCO_3^0) mengurangi konsentrasi Ca^{2+} dan CO_3^{2-}

bebas yang tersedia untuk presipitasi kalsit sekitar 15-20%, faktor yang tidak diperhitungkan dalam metode manual.

Observasi lapangan selama periode operasi Sumur DEF-07 (2019-2024) mengkonfirmasi bahwa tidak terdapat kalsit *scaling* pada sistem produksi, pipa, maupun fasilitas permukaan. Hal ini memvalidasi prediksi PHREEQC yang menunjukkan kondisi undersaturated dan mengindikasikan bahwa perhitungan manual menghasilkan *false positive* yang dapat menyebabkan keputusan treatment yang tidak perlu dan pemborosan biaya operasional.

D. Implikasi Operasional dan Rekomendasi

Berdasarkan hasil evaluasi komparatif, terdapat beberapa implikasi operasional dan rekomendasi untuk pengelolaan *scaling* di Lapangan Panas Bumi XYZ. Untuk indeks saturasi silika, kedua metode memberikan prediksi yang konsisten dengan deviasi rata-rata 13,43% yang masih dapat diterima untuk tujuan skrining awal. Metode manual dapat digunakan untuk *monitoring* harian atau mingguan dengan menetapkan *threshold* SSI > 1,15 sebagai trigger untuk analisis lebih lanjut menggunakan PHREEQC. Simulasi PHREEQC direkomendasikan untuk konfirmasi bulanan, analisis detail dalam perencanaan *maintenance*, dan evaluasi berbagai skenario operasional alternatif seperti perubahan laju produksi atau temperatur *wellhead*. Untuk indeks saturasi kalsit, PHREEQC wajib digunakan karena metode manual menghasilkan prediksi yang tidak akurat dengan error sistematis lebih dari 100%. Keputusan terkait *treatment* kalsit *scaling* harus didasarkan pada hasil simulasi PHREEQC yang telah tervalidasi dengan observasi lapangan. Penggunaan metode manual untuk CSI tidak direkomendasikan dan dapat menyebabkan *false alarm* yang berakibat pada pemborosan biaya *treatment* yang tidak diperlukan.

Strategi integrasi kedua metode direkomendasikan sebagai pendekatan optimal dimana metode manual digunakan untuk skrining cepat dan identifikasi awal potensi masalah, sementara PHREEQC digunakan untuk analisis mendetail, konfirmasi hasil, dan pengambilan keputusan operasional yang memiliki implikasi biaya signifikan. Kombinasi ini memberikan keseimbangan antara efisiensi operasional dan akurasi prediksi.

Rekomendasi operasional spesifik untuk Sumur DEF-07 dan Lapangan XYZ adalah sebagai berikut. Pertama, fokus mitigasi *scaling* harus diarahkan pada silika *scaling* dengan kontrol temperatur discharge yang dipertahankan > 150°C untuk meminimalkan supersaturasi. Kedua, evaluasi *cost-benefit analysis* untuk aplikasi inhibitor silika kimia ketika SSI PHREEQC > 1,2 secara konsisten selama 3 bulan berturut-turut. Ketiga, *treatment* kalsit *scaling* tidak diperlukan karena kondisi undersaturated telah tervalidasi baik oleh simulasi PHREEQC maupun observasi lapangan. Keempat, optimasi jadwal *maintenance* dan inspeksi fasilitas produksi berdasarkan prediksi *scaling* rate dari PHREEQC. Kelima, *monitoring trend* SSI bulanan untuk deteksi dini perubahan kondisi reservoir yang dapat mengindikasikan *cooling*, *mixing*, atau perubahan karakteristik fluida produksi. Perlu dicatat bahwa 'lebih kompleks' tidak selalu berarti 'lebih baik' dalam semua konteks operasional. Software seperti PHREEQC memberikan akurasi superior untuk perhitungan CSI (error <10% vs >200%), namun untuk SSI, metode manual masih memberikan nilai praktis dengan error 13-20% yang masih dalam engineering tolerance untuk screening harian. Pemilihan metode harus mempertimbangkan trade-off antara akurasi, kompleksitas, dan kebutuhan operasional.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menjawab gap penelitian dengan menyediakan kriteria kuantitatif berbasis validasi lapangan untuk pemilihan metode perhitungan indeks saturasi, menunjukkan bahwa kompleksitas software tidak selalu diperlukan untuk semua aplikasi, namun critical untuk

parameter tertentu (CSI) dimana asumsi metode manual gagal secara fundamental pada kondisi geothermal. Temuan ini memberikan implikasi praktis signifikan: industry dapat mengoptimalkan resources dengan menggunakan metode manual untuk monitoring SSI rutin (menghemat waktu analisis hingga 77%), namun wajib menggunakan PHREEQC untuk CSI guna menghindari false alarm yang berpotensi menyebabkan pemborosan biaya treatment hingga puluhan juta rupiah per tahun. Evaluasi komparatif Indeks Saturasi Silika dan Kalsit menggunakan perhitungan manual dan simulasi PHREEQC pada Sumur DEF-07 Lapangan Panas Bumi XYZ periode Mei hingga September 2024 menunjukkan hasil yang berbeda untuk kedua parameter. Untuk SSI, kedua metode konsisten menunjukkan kondisi saturasi hingga supersaturasi ($SSI > 1$) dengan deviasi relatif rata-rata 13,43%, dimana metode manual menghasilkan rentang 0,99-1,17 sementara PHREEQC menghasilkan rentang yang lebih tinggi 1,19-1,26. Analisis korelasi Pearson menunjukkan konsentrasi SiO_2 sebagai parameter dominan dengan korelasi sangat kuat ($r = 0,956$), temperatur berkorelasi negatif sangat kuat ($r = -0,842$), dan klorida berkorelasi positif kuat ($r = 0,634$). Untuk CSI, terdapat perbedaan fundamental dan kontradiktif dimana metode manual menghasilkan nilai positif mendekati nol (0,007-0,008) yang mengindikasikan mendekati saturasi, sementara PHREEQC menghasilkan nilai negatif signifikan (-2,19 hingga -1,61) yang mengindikasikan *undersaturated* dengan selisih rata-rata sekitar 1,88 unit CSI. Perbedaan ekstrem ini disebabkan oleh ketidakmampuan metode manual dalam mengoreksi K_{sp} kalsit terhadap temperatur tinggi, mengabaikan koefisien aktivitas pada kekuatan ionik tinggi, dan menyederhanakan spesiasi sistem karbonat.

Pemilihan metode harus disesuaikan dengan tujuan dan tingkat akurasi yang diperlukan, dimana metode manual cocok untuk skrining awal SSI dengan kecepatan dan kesederhanaan sebagai keunggulan, namun PHREEQC wajib digunakan untuk perhitungan CSI dan untuk pengambilan keputusan operasional yang memiliki implikasi biaya signifikan. Strategi integrasi kedua metode direkomendasikan dimana metode manual digunakan untuk *monitoring* harian atau mingguan dengan PHREEQC untuk konfirmasi bulanan dan perencanaan detail. Untuk kondisi spesifik Lapangan XYZ, silika *scaling* merupakan concern utama yang memerlukan mitigasi serius melalui kontrol temperatur dan evaluasi inhibitor kimia, sedangkan kalsit *scaling* bukan masalah operasional sebagaimana telah divalidasi oleh prediksi PHREEQC dan observasi lapangan selama periode 2019-2024.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sofyan, H. S. Aka, B. Y. Suranta, dan 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.
- [2] A. Sofyan, J. Szanyi, dan 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.
- [3] S. N. Salim, D. Winardhi, dan S. Widodo, "Analisis Potensi Scaling pada Sistem Panas Bumi menggunakan Metode Geokimia," *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 16, no. 2, pp. 115-128, 2020.
- [4] R. O. Fournier dan J. J. Rowe, "The solubility of amorphous silica in water at high temperatures and high pressures," *American Mineralogist*, vol. 62, pp. 1052-1056, 1977.
- [5] A. Sofyan, S. Wiharti, J. Szanyi, B. Yudho Suranta, dan 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.
- [6] W. A. Duffield dan J. H. Sass, "Geothermal Energy: Clean Power from the Earth's Heat," *U.S. Geological Survey Circular*, vol. 1249, pp. 1-43, 2003.

- [7] D. L. Parkhurst dan 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," U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, pp. 1-497, 2013
- [8] C. A. J. Appelo dan D. Postma, "Geochemistry, Groundwater and Pollution," 2nd ed., Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 2005.
- [9] A. Sofyan, H. S. Aka, A. M. Rizaldy, dan B. Y. Suranta, "Development of Indonesian Wellhead Generating Unit (Small Scale) Based on Legal and Regulation of PT. Geo Dipa XYZ: A Case Study," dalam 2nd Borobudur International Symposium on Science and Technology (BIS-STE 2020), Atlantis Press, Aug. 2020, pp. 72-82.
- [10] PHREEQC (Version 3)—A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, U.S. Geological Survey, 2013. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3>
- [11] J. Cohen, "Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences," 2nd ed., Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.
- [12] A. Sofyan, Y. D. G. Bujang, dan 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] 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.
- [14] A. Sofyan, H. S. Aka, dan 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, pp. 1-15, 2020.
- [15] A. Sofyan, R. Jaya, H. Susanto, R. M. Njeru, G. Bozsó, dan 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.

Daftar Simbol

SSI	=	Indeks Saturasi Silika
CSI	=	Indeks Saturasi Kalsit
T	=	Temperatur, °C atau K
C	=	Konsentrasi kelarutan silika, ppm
m	=	Molalitas, molal
IAP	=	Produk Aktivitas Ion
Ksp	=	Konstanta Hasil Kali Kelarutan
γ	=	Koefisien aktivitas
I	=	Kekuatan aktivitas
r	=	Koefisien korelasi Pearson