

Studi Perkiraan Potensi Pembentukan Indeks *Scale Calcium Carbonate* Dari Sampel *Brine Sintetik* (Variabel CO_3 dalam Air Formasi)

Dian Indri Astuti¹, Sri Rahayu Gusmawarni^{1*}, M Sri Prasetyo Budi²

¹Teknik Kimia, Universitas AKPRIND Indonesia

²Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

*Korespondensi: dianindri958@gmail.com, gusmarwani@akprind.ac.id, prasetyobudi@itny.ac.id

ABSTRAK

Penurunan produksi minyak bumi yang terjadi akibat adanya padatan dalam peralatan produksi yang disebabkan adanya ketidakseimbangan ion dalam air formasi. Pembentukan *scale* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain karakteristik properti fluida terproduksi, terutama pada jenis minyak berat, akibat perubahan temperatur, tekanan, pH, dan komposisi mineral air formasi yang melebihi batas kelarutan memicu terbentuknya padatan *scale*. Pada sumur minyak biasanya akan ditemukan air formasi yang mengandung ion-ion kalsium, barium, karbonat, sulfat, magnesium, natrium dan klorida. Pada penelitian ini dilakukan pembuatan *brine* sintetik dengan komposisi yang menyerupai air formasi lapangan sebagai alternatif dalam solusi pengujian pengukuran indeks *scale* skala laboratorium dan menghemat waktu sehingga dapat mempercepat pengujian. Pembuatan *brine* sintetik ini dapat memanfaatkan bahan-bahan dari laboratorium seperti kalsium, barium, karbonat, sulfat, magnesium, natrium dan klorida yang dilarutkan dalam air aquades. Kemudian dilakukan percobaan perubahan massa salah satu ataupun beberapa mineral pada formula air formasi pada beberapa ion mineral sebagai kunci dalam pembuatan *brine* sintetik yang menyerupai dengan kondisi di lapangan. Pengujian *brine* menggunakan metode kompleksimetri analisa air formasi secara kimia dan fisika seperti pengujian air formasi dari lapangan.

Kata kunci: air formasi, *brine* sintetik, *scale*

ABSTRACT

Decrease in oil production that occurs due to the presence of solids in production equipment caused by ion imbalances in formation water. due to ion imbalance in formation water. Scale formation can be influenced by several factors including the property characteristics property characteristics of the produced fluid, especially in heavy oil types, due to changes in temperature, pressure, pH, and mineral composition of formation water that exceeds the solubility limit. solubility triggers the formation of scale solids. In oil wells will usually formation water containing ions of calcium, barium, carbonate, sulphate, magnesium, sodium and chloride. In this study, the manufacture of synthetic brine with a composition that resembles field formation water as an alternative in laboratory scale scale index measurement testing solutions and and save time so as to speed up testing. Manufacture of synthetic brine this synthetic brine can utilise materials from the laboratory such as calcium, barium, carbonate, sulphate, magnesium, sodium and chloride dissolved in distilled water. Then experiments were carried out to change the mass of one or in the formation water formula on several mineral ions as a key in making synthetic brine. key in making synthetic brine that resembles the conditions in the field. Brine testing using the compleximetric method of formation water analysis chemically and physically like testing formation water from the field.

Keyword : formation water, synthetic brine, scale

PENDAHULUAN

Penurunan produksi yang terjadi dalam industri minyak dan gas bumi sering diakibatkan oleh adanya pembentukan *scale* atau endapan. Penyebab terjadinya endapan tersebut dapat diakibatkan dari beberapa parameter faktor yaitu berdasarkan perubahan temperatur, tekanan, pH, dan bercampurnya dua fluida formasi yang *incompatible* yang menyebabkan batas kelarutan senyawa ataupun mineral yang terkandung di dalam fluida formasi melebihi batas dan membentuk padatan. Perubahan suhu dan lama waktu kontak merupakan Air formasi adalah fluida yang dapat melarutkan ion-ion yang terdapat dalam reservoir minyak dan gas alam dalam

suatu formasi geologi yang sama. Pada sumur minyak biasanya akan ditemukan air formasi yang mengandung ion-ion kalsium, barium, karbonat, sulfat, magnesium, natrium dan klorida [2]. Kandungan ion-ion dalam air formasi tersebut akan memberikan peran terhadap penurunan produksi minyak dan gas bumi karena dapat memicu adanya endapan. Disisi lain air formasi memainkan peran penting dalam industri minyak dan gas (migas) serta kimia yaitu pengelolaan limbah dan lingkungan, pengolahan dan penggunaan kembali, pengaruh terhadap produksi dan peralatan serta ekonomi dan efisiensi operasi. Proses produksi minyak bumi memberikan efek perubahan suhu dan tekanan sehingga anion-kation yang semula larut dalam air formasi terganggu kesetimbangannya dan menghasilkan padatan-padatan yang disebut dengan *scale*. Padatan ini akan mengendap dan menyumbat aliran pada jalur yang dilewati air terproduksi seperti perforasi, *gravel pack*, pompa, *tubing*, *choke* dan *valve*, hingga seperator [3]. Pembuatan *brine* sintetik dalam penelitian ini dimaksudkan untuk mendapatkan formula yang menyerupai kondisi air formasi di lapangan dengan memanfaatkan bahan dasar bahan kimia atau hasil alam. Tujuan dari pembuatan tersebut untuk mereplikasikan komposisi ion air formasi, menjadi salah satu alternatif dalam solusi pengujian pengukuran indeks *scale* skala laboratorium, memungkinkan efisiensi waktu dan efektifitas penentuan indeks *scale* sehingga mempercepat pengujian. Pembuatan *brine* sintetik dengan menggunakan batuan karbonat atau dengan bubuk $MgCO_3$ sebagai bahan utama untuk mendapatkan nilai kandungan CO_3^{2-} yang menyerupai lapangan kemudian ditambahkan bahan kimia lainnya untuk mendapatkan nilai dari ion yang lain yang sesuai dengan kondisi di lapangan [4] [5].

Scale merupakan endapan yang terbentuk dari proses kristalisasi dan pengendapan mineral yang terkandung dalam air formasi. Kandungan ion mineral yang melebihi keadaan kesetimbangan dapat menyebabkan terjadinya endapan yang menyebabkan penurunan produksi minyak dan gas bumi serta dapat menyumbat aliran di sumur, peralatan produksi serta *pipe line* [6]. Pembentukan endapan ini dapat terjadi di lepas pantai maupun di darat dapat terjadi melalui 3 mekanisme antara lain pencampuran dua larutan air asin yang tidak kompatibel, perubahan kondisi (suhu dan tekanan), dan penguapan air asin [7]. Endapan atau *scale* yang mengendap di dalam pipa dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. *Scale* pada pipa produksi

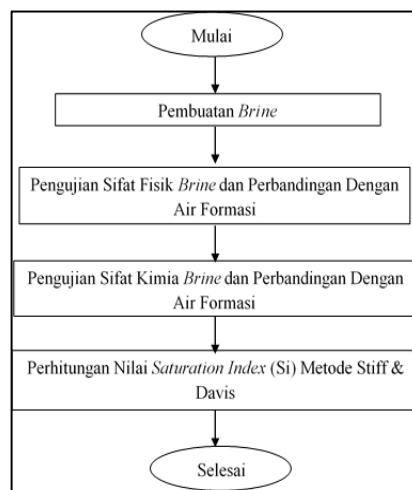
Fluida formasi yang berasal dari lingkungan batuan karbonat akan bercampur dengan ion-ion anorganik yang bersifat kation (ion positif) dan anion (ion negatif) [8]. Ion – ion tersebut dapat berinteraksi dan membentuk endapan atau *scale*, hal ini sering terjadi pada proses produksi hidrokarbon. *Scale* atau endapan yang terbentuk merupakan hasil reaksi kimia antara *Carbonate* (CO_3^{2-}) dengan *Calcium* (Ca^{+}) dan atau dari Magnesium (Mg) yang terkandung dalam air formasi. Perubahan parameter dalam air formasi yaitu perubahan komposisi ionik air formasi, pH dan suhu memicu proses pembentukan endapan *scale* [9]. Adapun jenis-jenis endapan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Jenis-jenis Endapan Scale [8]

Jenis-Jenis Scale	Rumus Kimia	Faktor Penting
Calcium Carbonate (Calcite)	CaCO ₃	Tekanan, Temperature, total garam terlarut
Calcium Sulfat		
- Gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	Tekanan, Temperature,
- Hemihydrate	CaSO ₄ .1/2 H ₂ O	Total garam terlarut
- Anhydrite	CaSO ₄	
Barium Sulfat (Barite)	BaSO ₄	Tekanan, Temperature,
Stronsium Sulfat (calestite)	SrSO ₄	Total garam terlarut
Senyawa Besi		
- Ferro Carbonate	FeCO ₃	
- Ferro Sulfida	FeS	Hasil korosi, gas-gas
- Ferro hydroxide	Fe(OH) ₂	terlarut dan pH
- Ferro oxide	Fe ₂ O ₃	

METODE PENELITIAN

Pada pengujian *brine* sintetik dan air formasi ini menggunakan metode kompleksimetri. Metode kompleksimetri adalah salah satu metode analisis kimia yang digunakan untuk menentukan konsentrasi ion logam dalam suatu larutan melalui pembentukan kompleks yang stabil dengan pengukuran volumetrik. Dalam pengujian ini titrasi menggunakan AgNO₃ sebagai titran karena melibatkan pembentukan endapan daripada kompleks koordinasi. Pengujian metode ini dilakukan pada pengukuran kadar ion Cl⁻ yang bertujuan untuk membentuk ikatan dengan ion mineral atau logam dan membentuk senyawa kompleks. Kadar ion – ion tertentu pada air formasi perlu diukur untuk memberikan prediksi terjadinya pembentukan *scale* pada peralatan produksi yang menyebabkan terjadinya penyumbatan aliran fluida, menunjukkan kualitas air formasi dan memberikan saran terhadap metode pengolahan air formasi secara tepat. Keunggulan dari metode ini yaitu akurasi tinggi, spesifik, fleksibel dan efektif. Namun, titrasi ini memerlukan kondisi pH dan suhu yang spesifik, waktu analisis yang lama serta mudah terganggu dari pembentukan kompleks ion lain. Pada pengujian kandungan kadar Mg²⁺ dan SO₄²⁻ menggunakan *Magnesium* dan *Sulfate Instant Test Kit* dengan pembacaan skala warna. Metode penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Metode Pengujian Penelitian Pembuatan *Brine* Sintetik dengan bahan MgCO₃

Dalam pengujian kimia ini menggunakan bahan dasar MgCO₃ dengan menambahkan bahan-bahan lain seperti MgCl₂, dan Na₂SO₄. Kemudian dilakukan pengujian penentuan alkalinitas dan pengujian kandungan Mg²⁺, Cl⁻, Na⁺ dan SO₄²⁻. Pada pengujian sifat fisika ditambahkan bahan NaOH untuk mendapatkan pH yang menyerupai dengan kondisi di lapangan. Penentuan kandungan ion dalam *brine* sintetik ini dapat

digunakan untuk mengetahui kecenderungan pembentukan *scale* dan atau korosi dari fluida yang mengalir dengan penggunaan metode *Stiff & Davis Stability Index* [10].

HASIL DAN ANALISIS

Pengujian analisa fisika dan kimia sampel air formasi dari lapangan dan sintetik untuk mengevaluasi potensi pertumbuhan dalam *scale*. Pengujian pertama berupa pengujian sampel lapangan secara kimia dan fisika digunakan untuk memperkirakan senyawa yang mungkin ada dalam air formasi tersebut dan sebagai dasar dalam memperkirakan serta menghitung massa setiap senyawa. Kemudian dilakukan pengujian terhadap sampel *brine* sintetik secara sifat fisika dimaksudkan untuk membuktikan pengaruh pH sampel dalam pembentukan *scale* dan kimiawi meliputi pengujian kandungan kadar Cl^- , CO_3^{2-} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , dan Na^+ , berikut merupakan hasil pengujian sampel air formasi dari lapangan dan sampel *brine* sintetik :

3.1. Pengujian Fisika

Pengujian fisika meliputi pengaruh pH dan warna dari sampel. Sampel lapangan memiliki pH sebesar 8.34 sedangkan sampel *brine* sintetik memiliki pH 6, sehingga perlu ditambahkan penyangga pH berupa NaOH untuk mendapatkan nilai pH yang menyerupai yaitu minimal pada 8.5 dan pH 9.9 yang didapatkan dari simulasi perhitungan prediksi endapan. Sampel air formasi lapangan dan *brine* sintetik memiliki warna yang hampir sama yaitu bening sedikit keruh.

3.2. Pengujian Kimia

Pengujian kimia meliputi perhitungan penentuan kadar alkalinitas, Klorida (Cl^-), Kalsium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Sulfat (SO_4^{2-}) dan Natrium (Na^+). Pengujian ini difokuskan untuk mendapatkan nilai kandungan CO_3^{2-} yang menyerupai lapangan. Berikut merupakan perhitungan dari masing-masing ion :

1. Penentuan Alkalinitas

$$\begin{aligned} V_p &= 0.3 \text{ mL} \\ V_m &= 1 \text{ mL} \\ \text{Sampel} &= 10 \text{ mL} \\ \text{Kebasahan P} &= \frac{V_p}{\text{ml sampel}} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &= 0.03 \\ \text{Kebasahan M} &= \frac{V_m}{\text{ml sampel}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$= 0.13$$

Maka $2P < M$ dan sifat kebasahan disebabkan oleh ion CO_3^- dan HCO_3^-

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi Ion HCO}_3^- &= 20 \times (M - 2P) \\ &= 20 \times (0,13 - 2(0,03)) = 1,4 \text{ Me/L} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi Ion CO}_3^- &= 40 \times P \times 60 \\ &= 40 \times 0,03 \times 60 \\ &= 72 \text{ mg/L} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{Konsentrasi OH} = 0 \text{ Me/L}$$

2. Penentuan Kadar Chlorida (Cl^-)

$$\begin{aligned} &\frac{\text{Vol Titration} \times 20000}{\text{ml Sampel}} \\ &= \frac{1.4 \times 20000}{10} = 2800 \text{ mg/L} \end{aligned} \quad (5)$$

3. Penentuan Kadar Calsium (Ca^{2+})

Kandungan Ca^{2+} disesuaikan dengan data lapangan yaitu 25.1 mg/L.

4. Penentuan Kadar Magnesium (Mg^{2+})

Kandungan Mg^{2+} = 200 mg/L

5. Penentuan Kadar Sulfat (SO_4^{2-})

Kandungan SO_4^{2-} = 300 mg/L

6. Penentuan Kadar Natrium (Na^+)

Kandungan Na^+ = Anion – kation = 3214.7 – 225.1 = 1633 mg/L

Hasil dari pengujian sampel air formasi lapangan dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sampel Air Formasi Lapangan LDK

No	Parameter	Satuan	Hasil
1	Salinitas	ppm	12900
2	pH	-	8.38
3	TDS	mg/L	10750
4	Na ⁺	mg/L	4312
5	K ⁺	mg/L	37
6	Ca ²⁺	mg/L	25.1
7	Mg ²⁺	mg/L	44.8
8	Ba ²⁺	mg/L	0.023
9	Fe ²⁺	mg/L	0.305
10	Cl ⁻	mg/L	6973
11	CO ₃ ²⁻	mg/L	73.5
12	SO ₄ ²⁻	mg/l	12.1
13	Bakteri	CFU/mL	0
14	Oil Content	mg/L	N/A

Berdasarkan dari hasil laboratorium sampel lapangan dapat diketahui bahwa terdapat potensi tinggi terbentuknya *scale* Kalsium Karbonat (CaCO₃) hal ini karena konsentrasi ion kalsium dan karbonat yang cukup tinggi serta kondisi pH yang mendukung. Selain itu, didukung oleh pH 8.38, konsentrasi Ca²⁺ 25.1 mg/L dan CO₃²⁻ 73.5 mg/L. Berdasarkan dari perhitungan dan dilakukan simulasi penambahan kadar Cl⁻ serta penambahan pH yang menyerupai kondisi di lapangan maka dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Hasil Pengujian Brine Sintetik dengan Bahan MgCO₃

No	Parameter	Satuan	Hasil
1	Salinitas	ppm	N/A
2	pH	-	8.5
3	Na ⁺	mg/L	4354.2
4	Ca ²⁺	mg/L	25.1
5	Mg ²⁺	mg/L	200
6	Cl ⁻	mg/L	7000
7	CO ₃ ²⁻	mg/L	72
8	SO ₄ ²⁻	mg/L	300
9	HCO ₃ ⁻	mg/L	42.7
10	OH ⁻	mg/L	0
11	Fe ²⁺	mg/L	0

Tabel 4. Hasil Analisa Konsentrasi Kation dan Anion Brine Sintetik

Anion	BM	Valensi	Mg/L	Me/L	Kation	BM	Valensi	Mg/L	Me/L
Cl ⁻	35.5	1	7000	197.1831	Fe ²⁺	56	2	0	0
SO ₄ ²⁻	96	2	300	6.25	Ca ²⁺	40	2	25.1	1.255
CO ₃ ²⁻	60	2	72	2.4	Mg ²⁺	24	2	200	20.83333
HCO ₃ ⁻	61	2	42.7	1.4	Na ⁺	23	1	4354.2	189.31
OH ⁻	17	1	0	0					0
TOTAL			207.2331		TOTAL			17.922	

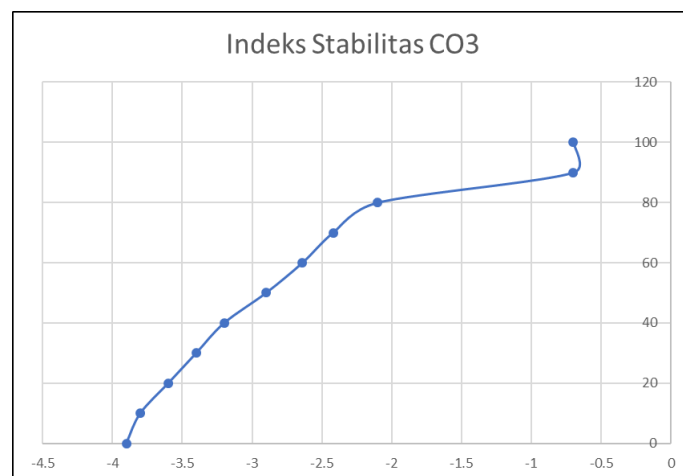
Tabel 5. Perhitungan Indeks Stabilitas CaCO₃ Brine Sintetik pada simulasi pH 8.5

Ion	Konsentrasi		Faktor Koreksi Me/L	Ionic strength
	BM	Me/L		
Cl ⁻	35.5	197.183	0.00005	0.009859155
SO ₄ ²⁻	96	6.25	0.00001	0.0000625
CO ₃ ²⁻	60	2.4	0.0015	0.0036
HCO ₃ ⁻	61	1.4	0.00005	0.00007
Ca ²⁺	40	1.255	0.00005	0.00006275
Mg ²⁺	24	20.8333	0.001	0.020833333
Fe ²⁺	1000	0	0.0015	0
Ba ²⁺	negatif	negatif	-	-
Na ⁺	23	185	0.001	0.185144765
Total Ionic Strength				0.219632504

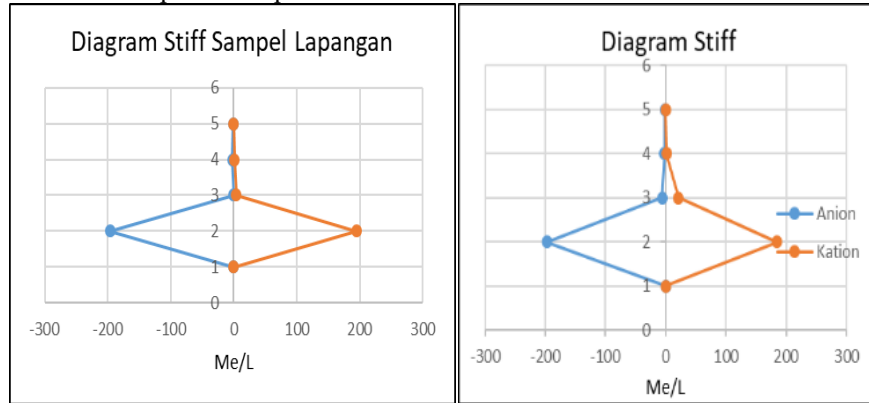
Tabel 6. Perhitungan Indeks Stabilitas CaCO₃ Brine Sintetik pada simulasi pH 9.9

Ion	Konsentrasi		Faktor Koreksi Me/L	Ionic strength
	BM	Me/L		
Cl ⁻	35.5	191.5492958	0.00005	0.009577465
SO ₄ ²⁻	96	6.25	0.00001	0.0000625
CO ₃ ²⁻	60	5.6	0.0015	0.0084
HCO ₃ ⁻	61	1.4	0.00005	0.00007
Ca ²⁺	40	1.255	0.00005	0.00006275
Mg ²⁺	24	41.66666667	0.001	0.041666667
Fe ²⁺	1000	0	0.0015	0
Ba ²⁺	negatif	negatif	-	-
Na ⁺	23	162	0.001	0.161877629
Total Ionic Strength				0.221717011

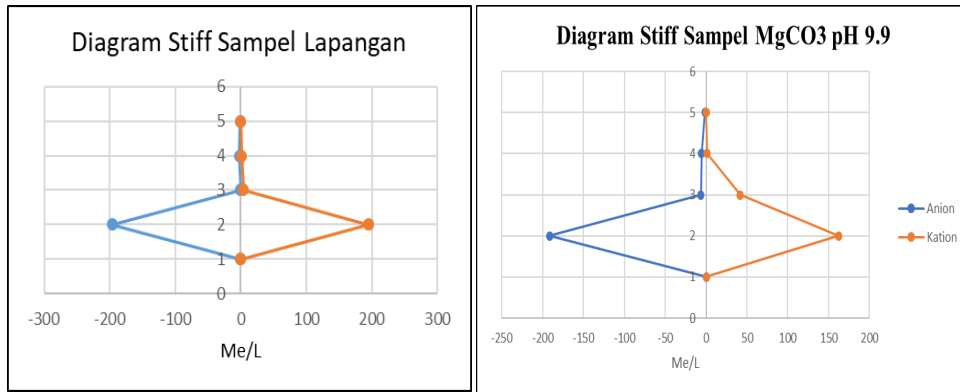
Berdasarkan perhitungan didapatkan grafik Grafik *Stability Index* (SI) pada berbagai Suhu Sampel Bahan MgCO₃ pada pH sebesar 6 tanpa perubahan pH maka indeks stabilitas dapat dilihat pada **Gambar 3**.

**Gambar 3.** Grafik Stability Index (SI) Pada berbagai Suhu Bahan MgCO₃ pH 6

Simulasi pH 8.5 dengan Cl^- yang menyerupai dengan kondisi di lapangan. Selain itu dilakukan simulasi pH 9.9 atau kondisi basa untuk mengetahui maksimum pH yang membentuk endapan *scale*, berikut merupakan hasil simulasi dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Gambar 5**.

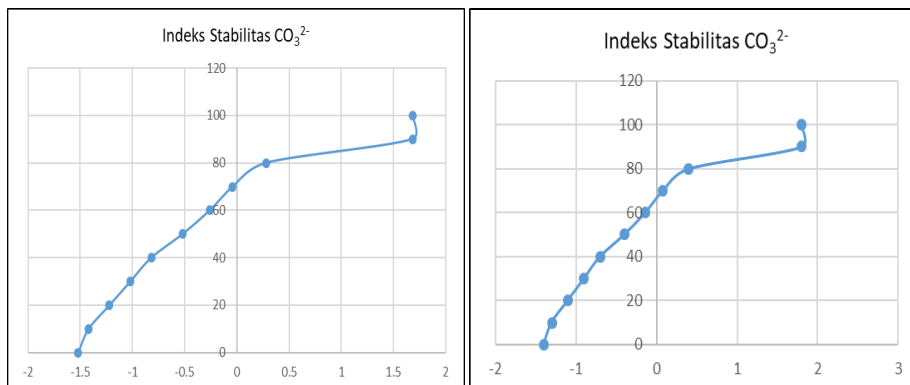


Gambar 4. Diagram Stiff Sampel Lapangan vs Bahan $MgCO_3$ pada pH 8.5

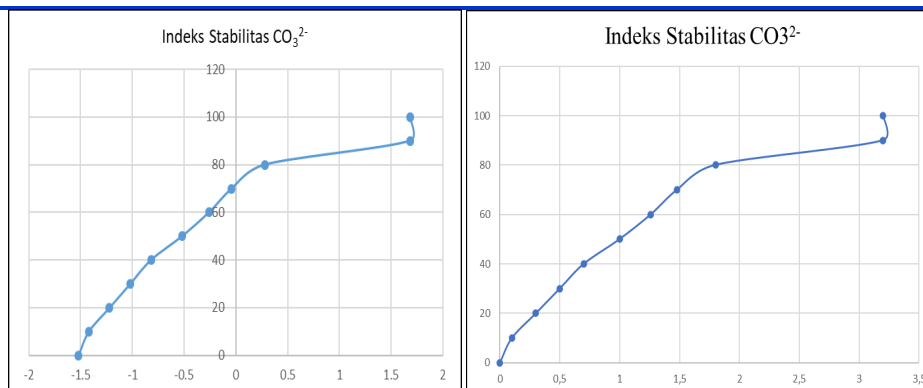


Gambar 5. Diagram Stiff Sampel Lapangan vs Bahan $MgCO_3$ pH 9.9

Air formasi lapangan yang dianalisis cenderung memiliki karakteristik salinitas tinggi dengan risiko terbentuknya *scale* dan korosi. Dominasi terbentuknya *scale* dipengaruhi oleh besarnya pH, berdasarkan perhitungan dapat dilihat pada **Gambar 6** dan **Gambar 7**.



Gambar 6. Grafik Stability Index (SI) Pada berbagai Suhu Sampel Lapangan vs Bahan $MgCO_3$ pH 8.5



Gambar 7. Grafik Stability Index (SI) Pada berbagai Suhu Sampel Lapangan vs Bahan MgCO₃ pH 9.9

Berdasarkan dari gambar di atas dapat dilihat bahwa pada pH 9.9 potensi terbentuknya *scale* semakin besar, dan hampir mendekati maksimum dalam terjadinya *scalling* pada peralatan produksi akibat air formasi dengan pH basa sebesar 9.9. Selain itu dapat diprediksi juga bahwa kemungkinan *scale* yang akan terbentuk berupa *scale calcium carbonat* yang diakibatkan karena besar ion CO₃²⁻ cukup tinggi untuk bereaksi dengan Ca²⁺. Dalam prakteknya dapat dimanfaatkan air formasi di lapangan sebagai sanitasi dan *steam* namun perlu diperhatikan dari adanya pengaruh kation dan anion dalam air formasi untuk menjaga proses agar optimal, usia peralatan, dan meminimalkan dampak lingkungan dari *scale* ataupun korosi. Selain itu, adanya ion negatif (anion) seperti Cl⁻ dan SO₄²⁻ dapat menyebabkan korosi dalam peralatan proses industri. Dalam prosedur pengulangan dan mencegah dari kemungkian terbentuknya *scale* ataupun korosi dari potensi yang disebabkan konsentrasi CO₃²⁻ dan Cl⁻ dapat dilakukan beberapa cara yaitu dengan pengendalian pH, penggunaan inhibitor *scale*, pengendalian *ion exchanger*, penggunaan inhibitor korosi dan mengontrol parameter seperti pH serta suhu. Hal ini akan membantu dalam pemilihan penggunaan material konstruksi yang tahan terhadap korosi maupun *scale* sehingga peralatan dapat beroperasi aman, tahan lama dan meminimalisir kerusakan alat.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan dalam penelitian ini yaitu :

1. *Brine* sintetik dapat dibuat dengan memperhatikan hasil uji laboratorium sampel lapangan dengan parameter yang mempengaruhi yaitu suhu dan pH.
2. Metode dari pengujian ini menggunakan metode titrasi kompleksimetri untuk pengukuran konsentrasi Alkalinitas, Kadar Cl⁻, pengukuran menggunakan *Magnesium* dan *Sulfate Instant Test Kit* berdasarkan perbedaan warna yang terbentuk bagi pengukuran kadar Mg²⁺ dan SO₄²⁺, parameter pH juga memberikan pengaruh terhadap kecepatan terbentuknya *scale* pada berbagai suhu.
3. Pada pH 8.5 dapat dilihat bahwa *brine* sintetik mulai memberikan informasi terkait pembentukan adanya kecenderungan pembentukan *scale* atau korosi sedangkan pada pH 9.9 endapan yang terjadi mencapai batas maksimumnya, adanya endapan ini akan menyebabkan terjadinya penyumbatan dalam peralatan produksi.
4. Saran yang dapat diberikan oleh peneliti yaitu pengujian dilakukan dengan alat yang terkalibrasi, bahan yang digunakan layak pakai dan ketelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) dan Laboratorium Analisa Fluida Reservoir, UPN "Veteran" Yogyakarta yang memberikan dukungan material dan kegiatan penelitian sehingga dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tjuwati Makmur N. Mekanisme dan Analisis Pembentukan Endapan Barium Sulfat di dalam Industri Peminyakan, *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi*. 2004; pp. 32-38.
- [2] Muhammad Shahzad Kamal IHMMASSMAS. Oilfield Scale Formation And Chemical Removal: A review, *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018; pp. 127-139.
- [3] Crabtree MeA. Fighting Scale-Removal and Prevention, *Oileld Rev*. 1999; pp. 30-45.
- [4] Vahid Valadbeygian MM. Static and Dynamic Evaluation of Formation Damage Due To Barium Sulfate Scale During Water Injection In Carbonate Reservoirs, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2023; pp. 1819-1831.
- [5] Z, Kiaei HA. Experimental Study of Using Ca-DTPMP Nanoparticles In Inhibition of CaCO₃ Scaling in a Bulk Water Process. *Desalination*. 2014; pp. 84-92.
- [6] M, A. Mengatasi Kerusakan Formasi Dengan Metoda Pengasaman Yang Kompetibel Pada Sumur Minyak Dilapangan X. *Journal of Earth Energy Engineering*. 2013.
- [7] Amer Badr BinMerdhah AAMYMAM. Laboratory and Prediction of barium sulfate scalling at hight-barium formation water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2010; pp. 79-88.
- [8] Riri Liestyana LSRP. *Analisa Air Formasi Terhadap kecenderungan Pembentukan Scale Calcium Carbonate (CaCO₃) dan Calcium Sulfate (CaSO₄)*. Prosiding Seminar Nasional Cendekiawan. 2018; Jakarta.
- [9] Olajire AA. Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges. *Energy*. 2014; pp. 963-982.
- [10] Dante Alighiri CFISEBH. Studi Pembentukan Scale CaCO₃ dan CaSO₄ pada Air Formasi Sumur Minyak di Cepu, Indonesia. *Jurnal Fisika*. 2018; pp. 28-36.
- [11] MG KF. Corrosion Engineering, New Delhi: MC Graw - Hill Publishing Company Ltd, 2005.
- [12] YXY, Wang LJ. Prevention and Control Technology Of Scaling and Corrosion in Oilfield Water Treatment,” *Petroleum*. 2018; pp. 129-140.
- [13] Tariq Almubarak JHCNMA SPaHANED. Insights on Potential Formation Damage Mechanisms Associated with the Use of Gel Breakers in Hydraulic Fracturing. *Polymers*. 2020; p. 22.
- [14] Ming Hua LYGBQXLWa.YF. A Cellulose Fracturing Fluid with Instant Solution and Residue, dalam *SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*, Perth, Australia, 2016.
- [15] Saebom Ko YZXWZ (DSPCDAKaMT. Deposit Prevention of Mineral Scales Using a Universal Dispersant of Carboxymethyl Cellulose, *SPE Journal*, 2022; p. 11.
- [16] Saebom Ko XWATKMBT. Growth Inhibition and Deposition Prevention of Sulfide Scales, *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020; p. 9.
- [17] Vahid V, Mastaneh H, Mohammad B. Static and Dynamic Evaluation of Formation Damage Due to Barium Sulfate Scale During Water Injection in Carbonate Reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2023; p. 1819–1831.
- [18] NM, Ahmad SL, *Analisa Air Formasi Dalam Menentukan Kecenderungan Pembentukan Scale pada Sumur X, Y dan Z*. Prosiding Seminar Nasional Cendekiawan. Jakarta, 2016.
- [19] Liestyana RLSaRP. *Analisa Air Formasi Terhadap Kecenderungan Pembentukan Scale Calcium Carbonate ([caco] _3) dan Calcium Sulfate ([CaSO] _4)*. Prosiding Seminar Nasional Cendekiawan. Jakarta, 2018.
- [20] DFCSI, Alighiri HEB. Studi Pembentukan Scale CaCO₃ dan CaSO₄ pada Air Formasi Sumur Minyak di Cepu, Indonesia. *Jurnal Fisika*. 2018.
- [21] MSHIMMSAS, Kamal SMA. Oilfield Scale Formation and Chemical Removal: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018; pp. 127-139.
- [22] T, Makmur NN. Mekanisme dan Analisis Pembentukan Endapan Barium Sulfat di dalam Industri Peminyakan. *Lembaran Publikasi Minyak dan Gas Bumi*. 2004; pp. 32-38.
- [23] Kamal Fontana M. Corrosion Engineering. New Delhi: McGraw-Hill. Publishing Company Ltd, 2005.
- [24] Patton CC. Applied Water Technology. Texas: Campbell Petroleum Series, 1995.
- [25] Winston Revie HHUR. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, Wiley, 2008.
- [26] Veil J. Produced Water Management Options and Technologies. *Produced Water: Environmental Risks and Mitigation Technologies*. Springer Publishing, 2011.
- [27] Khatib ZVP. Water to Value – Produced Water Management for Sustainable Field Development of Mature and Green Fields. *Journal of Petroleum Technology*. 2003.