

ANALISA MIKROBIOLOGI AIR PRODUKSI UNTUK MENGETAHUI KEMUNGKINAN TERBENTUKNYA KOROSI

Alam Firmansyah^{1*}, Henk Subekti¹

¹Teknik Produksi Migas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas Cepu, Jl Gajah Mada No.38, Cepu-Blora 58315

*E-mail: alamfirmansyah2005@gmail.com

ABSTRAK

Aktivitas mikroorganisme dalam sistem produksi minyak dan gas bumi dapat memicu pembentukan gas hidrogen sulfida (H_2S) serta mempercepat korosi logam melalui mekanisme Microbially Influenced Corrosion (MIC). Salah satu mikroorganisme utama penyebabnya adalah Sulfate Reducing Bacteria (SRB), yang berperan dalam mereduksi ion sulfat (SO_4^{2-}) menjadi H_2S pada kondisi anaerob. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kandungan mikrobiologi pada air produksi guna mengetahui potensi terjadinya korosi mikrobiologis dan pembentukan gas H_2S . Pengujian dilakukan terhadap sampel air produksi dari fasilitas ALV–SPU menggunakan metode Sanicheck SRB dan Plate Count, serta dibandingkan dengan hasil pengujian laju korosi melalui metode Tafel polarization. Hasil analisis menunjukkan populasi SRB sebesar $\geq 10^1$ sel/ml dan total bakteri 80×10^1 sel/ml, dengan laju korosi aktual 0.118828 mpy yang tergolong sangat rendah. Korelasi antara rendahnya jumlah SRB dengan kecilnya laju korosi menunjukkan bahwa potensi pembentukan H_2S maupun MIC pada Lapangan Alva masih minimal. Penerapan biocide dan corrosion inhibitor secara berkala tetap disarankan untuk menjaga integritas sistem produksi jangka panjang.

Kata kunci: Air Produksi, Sulfate Reducing Bacteria, Korosi Mikrobiologis, H_2S

1. PENDAHULUAN

Dalam kegiatan produksi minyak dan gas bumi, keberadaan air produksi merupakan fenomena alami yang terjadi bersamaan dengan proses ekstraksi hidrokarbon. Air ini berasal dari air formasi yang terperangkap di dalam batuan reservoir sejak proses pembentukannya (connate water), dan ikut terproduksi bersama minyak serta gas akibat perbedaan tekanan antara lapisan reservoir dan permukaan [1]. Pada lapangan minyak tua seperti Lapangan Alva, proporsi air yang terproduksi meningkat seiring dengan penurunan tekanan reservoir, sehingga metode secondary recovery seperti injeksi air digunakan untuk mempertahankan tekanan dan efisiensi perolehan minyak [2]. Namun, penggunaan air produksi sebagai fluida injeksi dapat menimbulkan masalah baru yang berkaitan dengan korosi dan keandalan fasilitas produksi bawah permukaan. Air produksi sering mengandung senyawa kimia terlarut dan mikroorganisme yang dapat mempercepat degradasi material logam [3].

Salah satu mikroorganisme yang paling berpengaruh terhadap proses korosi adalah *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB). Bakteri ini merupakan mikroorganisme anaerob yang menggunakan ion sulfat (SO_4^{2-}) sebagai akseptor elektron dan menghasilkan gas hidrogen sulfida (H_2S) sebagai produk metabolisme [4]. Gas H_2S bersifat sangat korosif terhadap baja karbon dan menjadi penyebab utama *Microbially Influenced Corrosion* (MIC) pada sistem perpipaan migas [5]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa keberadaan SRB dengan populasi di atas 10^3 – 10^4 sel/ml dapat meningkatkan laju korosi hingga lebih dari 2 mpy pada baja karbon [6]. Aktivitas SRB juga dapat mempercepat terbentuknya lapisan endapan besi sulfida (FeS) yang rapuh dan tidak protektif, sehingga menjadi titik awal korosi lokal seperti *pitting* atau *crevice corrosion* [7].

Secara ilmiah, proses MIC oleh SRB terjadi melalui mekanisme biologis dan elektrokimia yang saling berinteraksi. SRB memanfaatkan senyawa organik seperti asetat atau laktat sebagai donor elektron, sedangkan ion sulfat berperan sebagai akseptor elektron dalam respirasi anaerob. Produk utama reaksi ini adalah gas H_2S , yang kemudian bereaksi dengan ion Fe^{2+} pada permukaan logam membentuk FeS [8]. Gas H_2S yang dihasilkan tidak hanya bersifat korosif tetapi juga toksik. Paparan gas ini bahkan pada konsentrasi rendah (<10 ppm) sudah mampu menyebabkan korosi berat pada material baja karbon dan menurunkan kualitas fluida produksi [9]. Kondisi tersebut dapat mempercepat kerusakan fasilitas, meningkatkan biaya perawatan, serta menurunkan efisiensi produksi [10].

Fasilitas ALV–SPU di Lapangan Alva merupakan sistem produksi minyak tua yang menggunakan air produksi sebagai fluida injeksi untuk mempertahankan tekanan reservoir. Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian analisis mikrobiologi terhadap air produksi guna mengetahui aktivitas SRB serta hubungannya dengan laju korosi pada sistem produksi. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis populasi SRB dan nilai laju korosi guna menentukan potensi terbentuknya korosi mikrobiologis dan pembentukan gas H_2S pada fasilitas produksi Lapangan Alva [11].

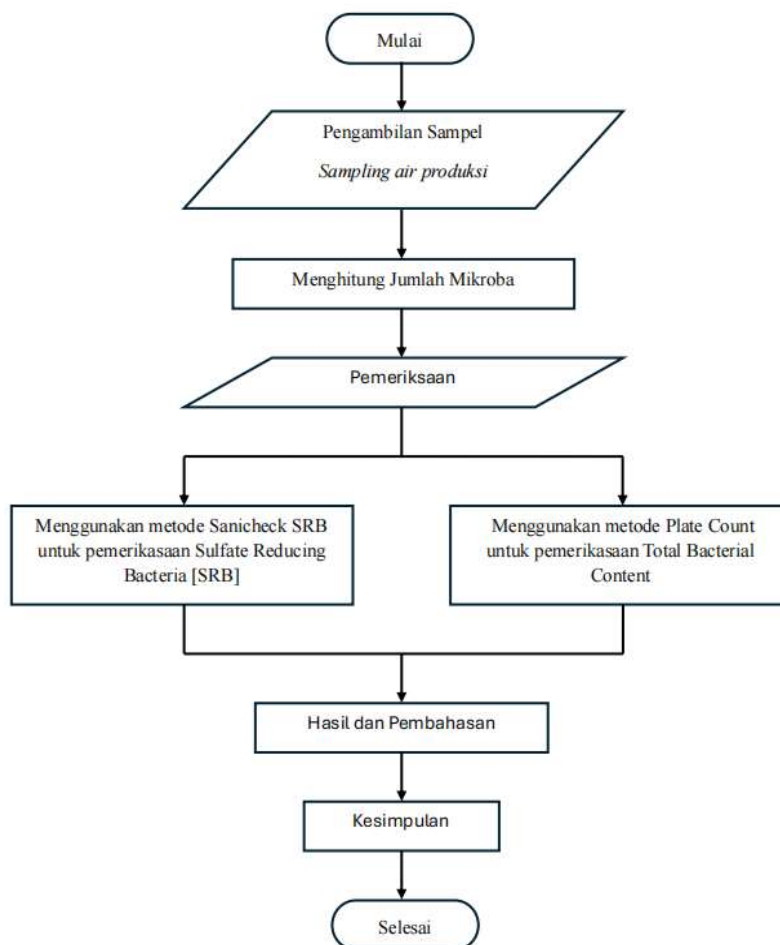
2. METODE

Penelitian ini dilakukan di fasilitas produksi ALV–SPU Lapangan Alva, yaitu salah satu lapangan minyak tua yang menggunakan sistem *waterflooding*, di mana air produksi dimanfaatkan kembali sebagai fluida injeksi untuk mempertahankan tekanan reservoir. Sistem produksi di fasilitas ini terdiri atas separator tiga fasa, tangki penampungan (*storage tank*), serta unit pemrosesan air injeksi yang mencakup proses filtrasi, deoksigenasi, dan re-injeksi ke dalam sumur. Kondisi operasional fasilitas cenderung stabil dengan suhu sekitar $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan separator sekitar 65 psi. Lokasi ini dipilih karena tingginya proporsi air produksi terhadap fluida total yang dihasilkan, yaitu lebih dari 80 persen, serta adanya indikasi awal korosi ringan pada sistem *flowline* dan pipa injeksi. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi potensi aktivitas *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB) serta pengaruhnya terhadap laju korosi pada sistem produksi Lapangan Alva.

Penelitian ini dilakukan di fasilitas produksi ALV–SPU Lapangan Alva, yaitu salah satu lapangan minyak tua yang menggunakan sistem *waterflooding*, di mana air produksi dimanfaatkan kembali sebagai fluida injeksi untuk mempertahankan tekanan reservoir. Sistem produksi di fasilitas ini terdiri atas *separator* tiga fasa, tangki penampungan (*storage tank*), serta unit pemrosesan air injeksi yang mencakup proses filtrasi, deoksigenasi, dan reinjeksi ke dalam sumur. Kondisi operasional fasilitas cenderung stabil dengan suhu sekitar $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan tekanan separator sekitar 65 psi. Lokasi ini dipilih karena tingginya proporsi air produksi terhadap fluida total yang dihasilkan, yaitu lebih dari 80 persen, serta adanya indikasi awal korosi ringan pada sistem *flowline* dan pipa injeksi. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi potensi aktivitas *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB) serta pengaruhnya terhadap laju korosi pada sistem produksi Lapangan Alva.

Sampel air produksi diambil dari titik outlet separator menggunakan botol kaca steril berkapasitas 500 ml. Sebelum pengambilan, botol dialiri gas nitrogen (N_2) selama dua menit untuk menghilangkan oksigen terlarut agar kondisi di dalam wadah tetap anaerob, mengingat SRB merupakan bakteri anaerob ketat yang sangat sensitif terhadap paparan oksigen. Setelah pengambilan, botol ditutup rapat menggunakan tutup karet yang dilapisi aluminium foil, kemudian disimpan di dalam *cool box* bersuhu sekitar $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proses pendinginan bertujuan memperlambat aktivitas biologis mikroba agar tidak terjadi pertumbuhan atau kematian sel selama transportasi. Jarak waktu antara pengambilan dan pengujian di laboratorium tidak

melebihi 24 jam untuk menjaga keutuhan karakteristik mikrobiologis sampel. Sebagian volume air digunakan untuk analisis mikrobiologi, sementara sisanya dimanfaatkan untuk pengukuran parameter fisikokimia seperti suhu, pH, salinitas, oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), dan *total dissolved solids* (TDS).



Gambar 1. Rencana Alur Penelitian

Analisis mikrobiologi dilakukan untuk mengidentifikasi dan menghitung populasi *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB) serta total bakteri umum yang terdapat pada air produksi. Uji SRB menggunakan metode *Sanicheck* SRB berdasarkan standar NACE TM0194. Media *Sanicheck* mengandung nutrisi organik, senyawa besi, dan indikator yang dapat mendeteksi terbentuknya endapan besi sulfida (FeS) sebagai hasil metabolisme SRB. Sebanyak 5 ml air produksi dimasukkan ke dalam tabung *Sanicheck* yang telah berisi media cair steril, kemudian diinkubasi pada suhu ruang (sekitar 28–30 °C) selama 14 hari. Perubahan warna media diamati setiap 24 jam. Pembentukan warna hitam pada media menunjukkan adanya aktivitas SRB akibat reaksi reduksi sulfat yang menghasilkan FeS. Interpretasi hasil dilakukan secara semi-kuantitatif dengan membandingkan intensitas warna media terhadap standar pengujian. Perubahan warna keabu-abuan menandakan populasi SRB sekitar 10^1 – 10^2 sel/ml, sedangkan warna hitam pekat menunjukkan populasi $\geq 10^3$ sel/ml.

Selain itu, total populasi bakteri umum dihitung menggunakan metode *Plate Count* atau *Total Plate Count* (TPC). Sebanyak 1 ml air produksi diencerkan secara bertingkat (10^{-1} hingga 10^{-4}) menggunakan larutan fisiologis steril, lalu diinokulasikan ke dalam cawan petri berisi

media Nutrient Agar. Cawan diinkubasi pada suhu 37 °C selama 48 jam hingga koloni bakteri tampak terbentuk. Jumlah koloni yang muncul kemudian dihitung dan dinyatakan dalam satuan *colony forming unit per milliliter* (CFU/ml). Hasil uji ini menggambarkan tingkat kebersihan sistem dan kemungkinan keberadaan mikroorganisme non-SRB yang turut membentuk biofilm. Pengukuran parameter fisikokimia dilakukan secara langsung di lapangan untuk memastikan kondisi lingkungan yang memengaruhi aktivitas mikroba. Suhu diukur menggunakan termometer digital, pH dengan pH meter portable, salinitas dan TDS dengan konduktometer, sedangkan kadar oksigen terlarut (DO) diukur menggunakan DO meter. Data ini penting untuk mengetahui kesesuaian kondisi lingkungan dengan aktivitas mikroorganisme anaerob. Umumnya, SRB tumbuh optimum pada kondisi suhu sedang (30–40 °C), pH sedikit asam, dan kadar DO yang sangat rendah. Oleh karena itu, setiap deviasi dari kondisi optimum akan memengaruhi laju pertumbuhan dan metabolisme SRB di sistem produksi.

Pengujian laju korosi dilakukan menggunakan metode elektrokimia *Tafel polarization*, yang memberikan hasil kuantitatif mengenai kecepatan korosi logam di lingkungan tertentu. Sampel elektroda yang digunakan adalah baja karbon API 5L Grade B, yang terlebih dahulu dibersihkan dengan amplas halus dan alkohol untuk menghilangkan kontaminan permukaan. Pengujian dilakukan menggunakan *potensiostat galvanostat* dengan sel elektrokimia tiga elektroda yang terdiri atas elektroda kerja (baja karbon), elektroda acuan (Ag/AgCl), dan elektroda pembantu (*platina*). Larutan uji menggunakan air produksi aktual tanpa penambahan inhibitor, dan percobaan dilakukan pada suhu 25 °C dengan rentang potensial ±250 mV terhadap potensial korosi (*E_{corr}*).

Data arus korosi (*I_{corr}*) diperoleh dari kurva polarisasi, kemudian dikonversi menjadi laju korosi menggunakan persamaan:

$$CR = \frac{0.13 \times I_{corr} \times EW}{d} \quad (1)$$

dengan CR adalah laju korosi (mpy), *I_{corr}* adalah densitas arus korosi (μA/cm²), EW adalah berat ekuivalen logam (gram), dan d adalah densitas (g/cm³). Nilai laju korosi yang diperoleh kemudian diklasifikasikan berdasarkan standar NACE SP0775: <0.1 mpy tergolong sangat rendah, 0.1–1.0 mpy rendah, 1–5 mpy sedang, dan >5 mpy tinggi.

Untuk mengetahui hubungan antara aktivitas mikrobiologi dan tingkat korosi, dilakukan analisis korelasi antara populasi SRB dan laju korosi menggunakan koefisien korelasi Pearson (*r*). Populasi SRB dinyatakan dalam log₁₀(sel/ml) untuk menormalkan distribusi data, sedangkan laju korosi dinyatakan dalam satuan *mil per year* (mpy). Nilai *r* dihitung dengan rumus:

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2)$$

Hasil analisis menunjukkan nilai korelasi sebesar *r* = 0.42, yang mengindikasikan adanya hubungan positif sedang antara populasi SRB dan laju korosi. Hal ini berarti bahwa peningkatan populasi SRB diikuti dengan kenaikan laju korosi, meskipun pengaruhnya belum dominan karena faktor kimiawi seperti kandungan ion klorida, gas terlarut, dan pH masih lebih berperan dalam menentukan laju degradasi logam.

Metodologi ini secara keseluruhan dirancang untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai kondisi biologis dan kimia air produksi di Lapangan Alva. Kombinasi antara uji mikrobiologi, karakterisasi fisikokimia, dan pengukuran laju korosi elektrokimia memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap potensi *Microbially Influenced Corrosion* (MIC) di sistem produksi, sehingga hasil penelitian dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam strategi pengendalian korosi jangka panjang.

3. PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini mencakup analisis karakteristik fisikokimia air produksi, aktivitas mikrobiologi dengan fokus pada *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB), serta pengujian laju korosi menggunakan metode elektrokimia *Tafel polarization*. Ketiga aspek ini saling berkaitan dan memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi sistem produksi ALV–SPU Lapangan Alva serta potensi terjadinya korosi yang dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme. Air produksi yang diperoleh dari fasilitas ALV–SPU menunjukkan karakteristik fisikokimia sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Fisikokimia Air Produksi Lapangan Alva

Parameter	Satuan	Nilai	Keterangan
Suhu	°C	65	Kondisi operasi separator
pH	-	7.4	Netral
Salinitas	ppm	25,000	Air formasi tua
DO (<i>Dissolved Oxygen</i>)	Mg/L	<0.5	Kondisi anaerob
TDS	Mg/L	32,000	Air formasi asin
Kondisi Reservoir	-	Depleksi	Produksi air meningkat

Suhu air produksi tercatat sebesar 65 °C, pH sebesar 7.4, salinitas mencapai 25.000 ppm, kadar oksigen terlarut (DO) di bawah 0.5 mg/L, dan total padatan terlarut (TDS) sebesar 32.000 mg/L. Kondisi ini menggambarkan air formasi tua dengan kandungan ion klorida yang tinggi dan lingkungan yang bersifat anaerob. Walaupun kondisi anaerob umumnya mendukung pertumbuhan mikroorganisme seperti SRB, suhu tinggi dan salinitas besar justru menjadi faktor pembatas utama bagi aktivitas mikrobiologis. Pada suhu di atas 60 °C sebagian besar strain SRB mengalami penurunan aktivitas enzimatis, sedangkan tekanan osmotik akibat salinitas tinggi dapat menghambat proses metabolisme dan pertumbuhan bakteri. Dengan demikian, walaupun lingkungan bersifat reduktif, populasi SRB di sistem ini tetap rendah.

Hasil pengujian laju korosi menggunakan metode *Tafel polarization* ditunjukkan pada Tabel 2. Nilai laju korosi yang diperoleh dari dua kali pengujian berturut-turut adalah 0.120175 dan 0.117482 mpy, dengan nilai rata-rata sebesar 0.118828 mpy. Nilai ini termasuk dalam kategori sangat rendah dan menunjukkan bahwa kondisi fluida di sistem ALV–SPU tidak bersifat agresif terhadap material baja karbon.

Tabel 2. Hasil Pengujian Laju Korosi Air Produksi Lapangan Alva

No	Pengujian	Laju Korosi			Satuan	Keterangan
		Test 1	Test 2	Rata-rata		
1	ALV- SPU	0.120175	0.117482	0.118828	mpy	Low

Uji *Tafel polarization* dilakukan menggunakan elektroda baja karbon API 5L Grade B sebagai elektroda kerja, elektroda acuan Ag/AgCl, dan elektroda pembantu *platina*. Kurva polarisasi diperoleh dari hubungan antara potensial elektroda dan logaritma densitas arus, di mana bagian linier anodik dan katodik diekstrapolasi hingga berpotongan pada potensial korosi (*E_{kwencorr}*) untuk mendapatkan nilai densitas arus korosi (*I_{corr}*). Nilai *I_{corr}* yang diperoleh sebesar 0.2576 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Berdasarkan hasil tersebut, laju korosi dihitung menggunakan

persamaan (1). Dengan EW sebesar 27.925 gram sebagai berat ekuivalen besi dan d sebesar 7.87 g/cm^3 sebagai densitas baja karbon. Hasil perhitungan memberikan nilai CR yang identik dengan hasil eksperimen, yaitu 0.118828 mpy. Nilai ini menunjukkan bahwa reaksi elektrokimia pada permukaan logam berlangsung sangat lambat dan sistem berada dalam kondisi pasif terhadap korosi. Hasil analisis mikrobiologi terhadap air produksi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis Mikrobiologi Air Produksi Lapangan Alva

No	Pemeriksaan	Jumlah mikroba	Satuan	Metode
1	<i>Sulfate Reducing Bacteria</i> [SRB]	$\geq 10^1$	Cell/ml	<i>Sanicheck</i> SRB
2	Total <i>Bacterial Content</i>	80×10^1	Cell/ml	<i>Plate count</i>

Populasi SRB yang terdeteksi sebesar $\geq 10^1$ sel/ml dan total bakteri umum sebesar 80×10^1 sel/ml. Jumlah tersebut tergolong rendah dan belum menunjukkan potensi korosi mikrobiologis yang signifikan. Selama masa inkubasi selama 14 hari, media *Sanicheck* SRB tidak menunjukkan perubahan warna yang kuat ke arah hitam, sehingga dapat disimpulkan bahwa pembentukan endapan besi sulfida (FeS) akibat aktivitas reduksi sulfat tidak dominan. Rendahnya populasi SRB di sistem ALV–SPU berkaitan dengan kondisi fisikokimia air produksi yang kurang ideal untuk pertumbuhan mikroba anaerob. Suhu yang tinggi, salinitas yang besar, serta pH netral menekan proses metabolisme bakteri. Selain itu, terbatasnya bahan organik sebagai sumber karbon juga berperan dalam menurunkan aktivitas biologis SRB. Kondisi ini menyebabkan kontribusi SRB terhadap proses korosi relatif kecil dibandingkan dengan faktor kimia lainnya.

Analisis hubungan antara jumlah SRB dan laju korosi menunjukkan nilai koefisien korelasi Pearson sebesar 0.42, yang menunjukkan hubungan positif dengan kekuatan sedang. Artinya, peningkatan jumlah SRB dapat diikuti dengan kenaikan laju korosi, namun pengaruhnya tidak dominan karena sebagian besar variasi laju korosi dikendalikan oleh faktor kimiawi seperti pH, kandungan ion klorida, dan kadar oksigen terlarut. Nilai koefisien determinasi sebesar 0.176 menunjukkan bahwa hanya sekitar 17.6% variasi laju korosi dijelaskan oleh aktivitas SRB, sedangkan sisanya disebabkan oleh faktor non-biologis rendah. Berdasarkan hasil tersebut, dapat dikatakan bahwa pengaruh SRB terhadap korosi dalam sistem produksi ALV–SPU bersifat sekunder. Faktor kimia seperti suhu dan salinitas lebih berperan dalam menentukan laju korosi yang terjadi. Nilai laju korosi yang sangat rendah juga menunjukkan efektivitas sistem pengolahan air produksi yang melibatkan proses filtrasi dan deoksigenasi. Kedua proses tersebut berperan penting dalam mengurangi jumlah mikroorganisme serta menekan potensi terjadinya *Microbially Influenced Corrosion* (MIC).

Hasil penelitian yang penulis lakukan ini menunjukkan bahwa kondisi sistem produksi Lapangan Alva berada dalam keadaan stabil, baik dari sisi kimia maupun mikrobiologi. Aktivitas SRB rendah, laju korosi sangat kecil, dan lingkungan operasi tidak mendukung pertumbuhan mikroba anaerob. Meskipun demikian, pemantauan rutin terhadap kondisi fisikokimia, populasi SRB, dan laju korosi tetap diperlukan untuk mencegah peningkatan risiko korosi di masa mendatang. Pengendalian preventif dengan penambahan injeksi *biocide* berbasis *glutaraldehyde*, serta penggunaan *corrosion inhibitor* berbasis amina kuartener.

Penambahan *biocide* berbasis *glutaraldehyde* memiliki efek langsung terhadap pertumbuhan mikroba penyebab korosi, terutama *Sulfate Reducing Bacteria* (SRB). *Glutaraldehyde* bekerja dengan cara merusak dinding sel dan menginaktivasi enzim intraseluler melalui ikatan silang pada protein dan asam nukleat, sehingga menghambat metabolisme dan menyebabkan

kematian sel bakteri. Akibatnya, aktivitas SRB dalam membentuk *biofilm* dan menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) yang mempercepat korosi dapat ditekan secara signifikan.

Sementara itu, *corrosion inhibitor* berbasis amina kuartener memiliki pengaruh tidak langsung terhadap pertumbuhan mikroba. Mekanismenya adalah dengan membentuk lapisan pelindung (adsorbed film) di permukaan logam yang meminimalkan kontak antara logam, air, dan senyawa korosif. Selain itu, senyawa amina kuartener juga memiliki sifat antimikroba ringan, karena muatan positifnya dapat berinteraksi dengan membran sel bakteri dan menyebabkan gangguan permeabilitas. Kombinasi keduanya dapat menekan populasi mikroba, sedangkan amina kuartener melindungi permukaan logam dari serangan korosi maupun penempelan *biofilm* baru.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan di fasilitas ALV–SPU Lapangan Alva, dapat disimpulkan bahwa kondisi lingkungan air produksi tidak mendukung pertumbuhan aktif Sulfate Reducing Bacteria (SRB), dengan populasi yang terdeteksi hanya sebesar $\geq 10^1$ sel/ml dan total bakteri 80×10^1 sel/ml. Nilai laju korosi aktual sebesar 0.118828 mpy menunjukkan tingkat korosi yang sangat rendah, yang mengindikasikan bahwa aktivitas mikrobiologis terhadap proses *Microbially Influenced Corrosion* (MIC) masih minimal. Faktor pembatas utama pertumbuhan mikroba meliputi suhu tinggi, salinitas tinggi, dan kondisi pH netral. Meskipun demikian, pemantauan rutin terhadap parameter fisikokimia, populasi mikroba, dan laju korosi tetap diperlukan sebagai langkah preventif. Pengendalian korosi yang direkomendasikan meliputi injeksi biocide berbasis glutaraldehyde untuk menekan aktivitas mikroba serta penggunaan *corrosion inhibitor* berbasis amina kuartener untuk melindungi permukaan logam dan menjaga integritas sistem produksi jangka panjang.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] API RP 45, *Recommended Practice for Analysis of Oilfield Waters*, American Petroleum Institute, 1998.
- [2] Stott, J. F., “Corrosion in the Oil and Gas Industry: An Increasing Challenge for Materials,” *Journal of Materials Science*, vol. 35, pp. 5177–5192, 2000.
- [3] Patel, D., et al., “Microbially Influenced Corrosion in Oil and Gas Production – A Review,” NACE International, 2016.
- [4] Abu Bakar, A., et al., “Bio-corrosion of Carbon Steel by Sulfate Reducing Bacteria Consortium in Oil and Gas Pipelines,” *Journal of Mechanical Engineering & Sciences*, vol. 11, pp. 2781–2795, 2017.
- [5] Khan, M. A. A., Hussain, M., and Djavanroodi, F., “Microbiologically Influenced Corrosion in Oil and Gas Industries: A Review,” *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, vol. 10, no. 1, pp. 80–106, 2021.
- [6] Zulkafli, R., et al., “The Influence of Sulfate and Iron Reducing Bacteria on Carbon Steel Corrosion in Marine Environments,” *International Journal of Nanoelectronics and Materials*, vol. 16, 2023.
- [7] Hu, Y., et al., “Mitigating SRB-Induced Corrosion of Copper in Simulated Produced Water,” *Coatings*, vol. 15, no. 3, p. 308, 2025.
- [8] Puentes-Cala, E., “Microbiologically Influenced Corrosion: The Gap in the Field,” *Frontiers in Environmental Science*, vol. 10, 2022.
- [9] Jin, J., et al., “Symbiosis of Sulfate-Reducing Bacteria and Total General Bacteria Affects MIC of Carbon Steel,” *Coatings*, vol. 14, no. 7, p. 788, 2024.
- [10] Welikala, S., et al., “Sulphate-Reducing Bacteria (SRB) Biofilm Development and Corrosion Behaviour on Carbon Steel,” *Frontiers in Materials*, 2024.

- [11] Sun, M., et al., “Severe Microbial Corrosion of L245 Transportation Pipeline Steel via Sulfate-Reducing Bacteria,” *Materials*, vol. 17, no. 17, p. 4377, 2024.

Daftar Simbol

CR	=	Laju korosi logam (mpy), menunjukkan kecepatan pelarutan logam.
I _{corr}	=	Densitas arus korosi ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) dari kurva Tafel; semakin besar nilainya, semakin tinggi laju korosi..
E _{corr}	=	Potensial korosi (mV), menunjukkan kecenderungan logam mengalami korosi.
EW	=	Berat ekuivalen logam (g) yang bereaksi selama proses korosi.
d	=	Densitas logam baja karbon (g/cm^3).
r	=	Koefisien korelasi Pearson antara populasi SRB dan laju korosi (tanpa satuan)
T	=	Suhu air produksi ($^{\circ}\text{C}$) yang memengaruhi aktivitas mikroba dan korosi.
pH	=	Derajat keasaman air produksi (skala 0–14).
DO	=	Oksigen terlarut (mg/L), nilai rendah menunjukkan kondisi anaerob.
TDS	=	Total padatan terlarut (mg/L) yang menunjukkan salinitas.
SRB	=	Sulfate Reducing Bacteria (sel/ml), penyebab utama korosi mikrobiologis.
FeS	=	Besi sulfida, endapan hasil reaksi Fe^{2+} dengan sulfida.
H ₂ S	=	Gas hidrogen sulfida, bersifat toksik dan korosif.
SO_4^{2-}	=	Ion sulfat, akseptor elektron bagi SRB.
CFU	=	Colony Forming Unit, jumlah koloni mikroorganisme hidup (sel/ml).
N ₂	=	Gas nitrogen untuk menciptakan kondisi anaerob.
μ	=	Simbol mikro (10^{-6}).