

## PENGEMBANGAN INOVASI SCALING MITIGATION REACTOR SEBAGAI TEKNOLOGI MEDIA KONTAK UNTUK REDUKSI SCALING PADA AIR FORMASI DALAM MEMENUHI STANDAR KUALITAS SUMUR *WATER INJECTION*

A. Setiawan<sup>1</sup>, R. Ivanda<sup>2</sup>, R. Nuryanti<sup>2</sup>, H. Budiman<sup>2</sup>, E. Kusniawati<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PT Pertamina Hulu Rokan,

<sup>2</sup>Politeknik Akamigas Palembang

\*Corresponding author e-mail: aldo.setiawan.eng@gmail.com

**ABSTRAK:** Air formasi merupakan limbah utama dari kegiatan eksploitasi minyak dan gas bumi yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah dengan baik. Permasalahan utama air formasi adalah tingginya kandungan mineral penyebab *scaling* yang dapat menghambat laju alir injeksi pada sumur injeksi air. Akumulasi *scale* dalam sumur menyebabkan penurunan injeksi air, sehingga terbentuknya *top tank* yang berpotensi dapat menghentikan sementara produksi minyak untuk menghindari *overflow* pada tangki air. Kondisi ini berdampak langsung terhadap penurunan efisiensi operasi *water injection* dan kontinuitas produksi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi kinerja inovasi *Scaling Mitigation Reactor* (SMR), yaitu media kontak berkapasitas 1000 BWPD yang dirancang untuk mengondisikan air formasi melalui kontak langsung dengan kombinasi pasir silika, karbon aktif, dan batu apung. Desain SMR didasarkan pada debit 0,00184 m<sup>3</sup>/s dan *Hydraulic Loading Rate* 10 m<sup>3</sup>/jam, menghasilkan luas penampang 0,66 m<sup>2</sup>, diameter 0,92 m, serta volume media 0,397 m<sup>3</sup> dengan *Empty Bed Contact Time* 361.26 detik dan kehilangan tekanan 0,098 psi. Hasil uji laboratorium menunjukkan penurunan kekeruhan 92%, dan TDS 88%, serta penurunan signifikan nilai indeks *scaling*. Temuan ini membuktikan bahwa SMR efektif dan ramah lingkungan sebagai teknologi pengkondisian air formasi untuk mengurangi potensi *scaling*, menjaga keberlanjutan operasi injeksi air, dan mempertahankan stabilitas produksi minyak.

Kata Kunci: *scaling mitigation*, *formation water treatment*, *contact media reactor*, *scale control*, Sumur Injeksi Air

**ABSTRACT:** *Produced water is one of the major by-products of oil and gas production activities and poses a significant environmental risk if not properly treated. The main issue associated with produced water is the high concentration of dissolved minerals that promote scaling, which can severely reduce the injection rate in water injection wells. Scale accumulation within the wellbore restricts flow, causing pressure buildup that leads to top tank formation on the surface. This condition often necessitates temporary shutdowns of oil production to prevent overflow in storage facilities, thereby reducing the efficiency of water injection operations and disrupting production continuity. This study aims to develop and evaluate the performance of the Scaling Mitigation Reactor (SMR), an innovative contact media system with a capacity of 1000 BWPD designed to condition produced water through direct interaction with a multi-layer combination of silica sand, activated carbon, and pumice. The SMR was designed for a flow rate of 0.00184 m<sup>3</sup>/s and a Hydraulic Loading Rate of 10 m<sup>3</sup>/h, yielding an effective cross-sectional area of 0.66 m<sup>2</sup>, a column diameter of 0.92 m, and a media volume of 0.397 m<sup>3</sup>, with an Empty Bed Contact Time of 361.26 seconds and a pressure drop of 0.098 psi. Laboratory evaluations indicated that the SMR achieved turbidity, dan TDS, reductions of 92%, dan 88%, respectively, along with a substantial decrease in the scaling index. These results confirm that SMR is an efficient, economical, and environmentally sustainable technology for mitigating scaling potential, enhancing water injection reliability, and maintaining oil production stability in field operations.*

Keywords: *scaling mitigation*, *formation water treatment*, *contact media reactor*, *scale control*, *water injection wells*

## 1 Pendahuluan

Dalam kegiatan eksploitasi minyak dan gas bumi, air formasi merupakan limbah cair dengan volume terbesar yang dihasilkan bersamaan dengan fluida reservoir. Menurut Arthur et al. (2005), proporsi air formasi dapat mencapai lebih dari 80% dari total fluida yang diproduksi pada lapangan tua (mature field). Air formasi mengandung berbagai senyawa terlarut seperti kalsium, magnesium, barium, dan sulfat yang berpotensi membentuk endapan mineral (scale) pada fasilitas produksi dan sistem injeksi air.

Proses pengendapan *scaling* terjadi akibat ketidakseimbangan kimia antara komponen terlarut dan kondisi tekanan-temperatur fluida (Zhao et al., 2019). Akumulasi endapan pada tubing, pipa injeksi, atau zona perforasi menurunkan konduktivitas formasi, meningkatkan *injection pressure*, dan mengurangi efisiensi sistem *waterflooding* (Moghadasi et al., 2004). Pada kondisi lapangan, penurunan laju alir injeksi sering menyebabkan terbentuknya top tank di permukaan akibat ketidakseimbangan antara laju produksi dan pembuangan air. Dalam kasus ekstrim, sumur produksi minyak harus dihentikan sementara untuk mencegah *overflow* pada tangki air, yang secara langsung menurunkan kontinuitas produksi dan efisiensi operasi (Ariyanto et al., 2021).

Berbagai metode pengendalian *scaling* telah dikembangkan, seperti *chemical inhibitor treatment*, *mechanical cleaning*, dan sistem filtrasi berlapis. Namun, sebagian besar metode tersebut memiliki keterbatasan dalam aspek biaya operasional, kebutuhan perawatan, serta potensi dampak lingkungan (Yuan et al., 2020). Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif yang lebih sederhana, ekonomis, dan berkelanjutan untuk mengondisikan air formasi sebelum proses injeksi.

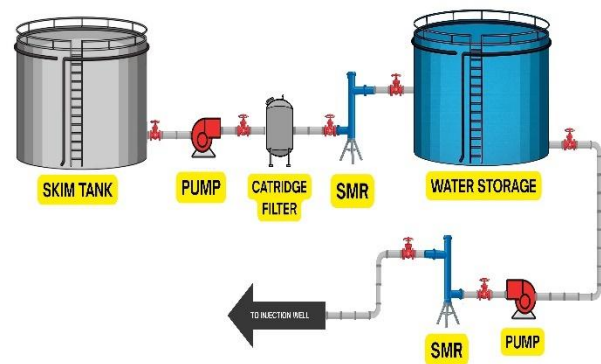
Sebagai inovasi, dikembangkan SMR (*Scaling Mitigation Reactor*), yaitu media kontak berorientasi vertikal yang dirancang untuk meningkatkan kualitas air formasi melalui interaksi langsung dengan kombinasi pasir silika, karbon aktif, dan batu apung. Desain SMR mengacu pada debit rancangan  $0,00184 \text{ m}^3/\text{s}$  dan *Hydraulic Loading Rate* 10 m/jam, menghasilkan luas penampang  $0,66 \text{ m}^2$ , diameter 0,92 m, serta volume media  $0,397 \text{ m}^3$  dengan *Empty Bed Contact Time* (EBCT) 361.26 detik dan kehilangan tekanan 0,162 psi.

Uji laboratorium menunjukkan bahwa SMR mampu menurunkan kekeruhan hingga 92%, *Total Dissolved Solids* (TDS) sebesar 88% dan *Total Suspended Solids* () sebesar 89% serta mengurangi nilai indeks scaling secara signifikan. Hasil ini membuktikan bahwa SMR efektif sebagai teknologi *conditioning* air formasi yang ramah lingkungan dan berpotensi menjaga keberlanjutan operasi injeksi air serta stabilitas produksi minyak pada lapangan tua.

## 2 Material dan Metodologi

### 2.1 Lokasi dan Prosedur Uji Lapangan

Uji kinerja SMR dilakukan secara langsung pada sumur injeksi aktif dengan laju alir operasi sebesar 750 BWPD. Air formasi dari sistem *produced water handling* dialirkan menuju unit SMR sebelum masuk ke sistem injeksi. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga titik, yaitu inlet SMR, pertengahan media, dan outlet SMR, untuk menilai efektivitas penurunan parameter kualitas air sepanjang lintasan media kontak. Parameter yang diuji meliputi pH, TDS, kekeruhan, , dan indeks scaling.



Gambar 1. Flow Design Scaling Mitigation Reactor

### 2.2 Bahan dan Komposisi Media

Media kontak pada SMR terdiri dari pasir silika (silica sand) (15%), zeolit (40%), karbon aktif (20%), dan batu apung (25%), dengan total massa 347.41 kg. Pemilihan material ini didasarkan pada karakteristik fisik dan kimiawi masing-masing media.



Gambar 2. Media Kontak Scaling Mitigation Reactor

### Pasir Silika (*Silica Sand*)

Pasir silika berperan sebagai lapisan filtrasi mekanis yang efektif dalam menyaring partikel tersuspensi, lumpur halus dan koloid dari air formasi. Struktur granularnya yang seragam memberikan kemampuan penyaringan hingga ukuran mikron kecil, menurunkan kekeruhan dan memperbaiki kejernihan air. Menurut Metcalf & Eddy (2014), filtrasi pasir silika mampu menurunkan *turbidity* hingga lebih dari 80%, dengan efisiensi tinggi pada kecepatan filtrasi rendah. Dalam penelitian ini, lapisan pasir silika menjadi tahap pertama yang menurunkan kekeruhan air formasi secara signifikan sebelum memasuki media berikutnya.

### Karbon Aktif (*Activated Carbon*)

Karbon aktif digunakan untuk proses adsorpsi bahan organik terlarut dan senyawa kimia reaktif yang dapat meningkatkan *Total Suspended Solids* (). Permukaan karbon aktif yang sangat luas (500–1500 m<sup>2</sup>/g) memungkinkan penyerapan senyawa aromatik, surfaktan, dan logam berat dari air formasi. Menurut Dutta et al. (2019), karbon aktif efektif menurunkan kadar dan TDS hingga 60–80% pada air formasi dan air limbah industri migas. Dalam penelitian ini, lapisan karbon aktif juga membantu menstabilkan pH dengan mengadsorpsi ion logam yang bersifat basa.

### Zeolit

Zeolit berfungsi sebagai media pertukaran ion (*ion exchanger*) yang sangat efektif untuk menghilangkan ion logam penyebab *scaling*, terutama Ca<sup>2+</sup> dan Mg<sup>2+</sup>. Struktur kristal zeolit yang memiliki rongga tetrahedral memungkinkan terjadinya pertukaran ion tanpa merusak kerangka mineral. Berdasarkan Widiastuti et al. (2020), zeolit alam Indonesia mampu menurunkan kekerasan air hingga 70–90%, sekaligus menurunkan nilai *Total Dissolved Solids* (TDS) dan *Scaling Index* (SI) secara signifikan. Dalam konteks SMR, lapisan zeolit berperan utama dalam menurunkan risiko pembentukan kerak (*scale*) di sumur injeksi.

### Batu Apung (*Pumice Stone*)

Batu apung berperan sebagai penyangga aliran (*flow stabilizer*) dan filtrasi tambahan yang memperluas waktu kontak antar lapisan media. Struktur pori batu apung yang besar meningkatkan distribusi aliran air dan mengurangi risiko *channeling*. Selain itu, batu apung memiliki kemampuan menyerap sebagian senyawa organik ringan dan partikel tersuspensi halus. Penelitian Mahvi et al. (2018) menunjukkan bahwa batu apung dapat menurunkan *turbidity* dan lebih dari 50% ketika digunakan sebagai lapisan pendukung dalam sistem multi-media *filtration*.

**Tabel 1.** Karakteristik dan Peran Media Kontak dalam Sistem *Scaling Mitigation Reactor*

| Media                                                  | Fungsi Utama                                                                                                   | Mekanisme Kerja                                    | Karakteristik                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Pasir Silika (<i>Silica Sand</i>)</b>               | Menyaring padatan tersuspensi, mengurangi kekeruhan                                                            | Filtrasi mekanis berdasarkan ukuran partikel       | <b>Ukuran butir 0.3–0.8 mm; porositas 0.35–0.45; densitas 1.5–1.7 g/cm<sup>3</sup></b>             |
| <b>Karbon Aktif (<i>Granular Activated Carbon</i>)</b> | Menyerap bahan organik, menurunkan dan TDS                                                                     | Adsorpsi fisika-kimia pada pori mikro/meso         | <b>Luas permukaan 500–1500 m<sup>2</sup>/g; densitas 0.4–0.7 g/cm<sup>3</sup>; ukuran 0.5–2 mm</b> |
| <b>Batu Apung (<i>Pumice</i>)</b>                      | Media stabilisasi aliran, penyaring tambahan ( <i>polishing filter</i> )                                       | Filtrasi fisik dan penyerapan ringan               | <b>Porositas 60–90%; densitas 0.4–0.9 g/cm<sup>3</sup>; ukuran 1–5 mm</b>                          |
| <b>Zeolit Alam (<i>Clinoptilolite</i>)</b>             | Pertukaran ion Ca <sup>2+</sup> dan Mg <sup>2+</sup> untuk menurunkan <i>hardness</i> dan <i>scaling index</i> | Ion exchange dan adsorpsi selektif terhadap kation | <b>CEC 100–200 meq/100 g; densitas 0.7–1.1 g/cm<sup>3</sup>; ukuran 0.5–3 mm</b>                   |

**Tabel 2.** Spesifikasi dan Distribusi Media Kontak SMR

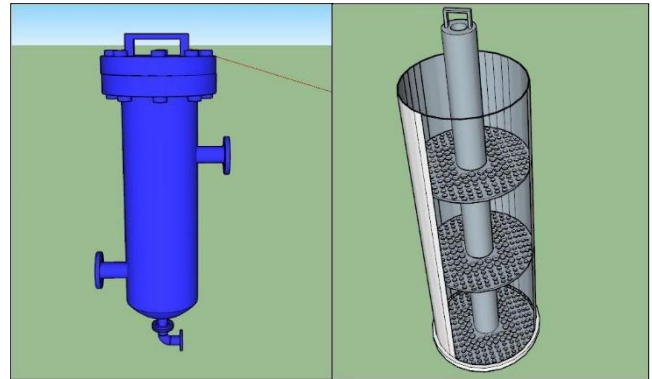
| Media                        | Fraksi (volume padatan) | Kedalaman lapisan (m) | Bulk density (kg/m <sup>3</sup> ) | Massa media (kg) |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------|
| Pasir silika                 | 15%                     | 0.15                  | 1,60                              | 82.96            |
| Zeolit                       | 40%                     | 0.40                  | 1,10                              | 152.10           |
| Karbon aktif (GAC)           | 20%                     | 0.20                  | 500                               | 34.57            |
| Batu apung ( <i>pumice</i> ) | 25%                     | 0.25                  | 900                               | 77.78            |
| <b>Total</b>                 | <b>100%</b>             | <b>1.00 m</b>         | —                                 | <b>347.41</b>    |

### 2.3 Desain dan Kapasitas Sistem SMR

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dan terapan dengan merancang serta menguji prototipe SMR (*Scaling Mitigation Reactor*) sebagai sistem pengkondisian air formasi sebelum diinjeksikan ke sumur injeksi. Desain SMR didasarkan pada kapasitas injeksi lapangan sebesar 1000 BWPD, dengan laju alir aktual pengujian sebesar 750 BWPD ( $\approx 0,00138 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Perhitungan hidrolik menunjukkan *Hydraulic Loading Rate* (HLR) sebesar 10 m/jam, menghasilkan luas penampang  $0,66 \text{ m}^2$ , diameter kolom  $0,92 \text{ m}$ , dan volume media  $0,397 \text{ m}^3$ . Waktu kontak efektif (*Empty Bed Contact Time*, EBCT) diperoleh sebesar 361.26 detik, dengan kehilangan tekanan sebesar  $0,098 \text{ psi}$ , menunjukkan sistem beroperasi secara stabil pada kondisi injeksi sumur.

**Tabel 3.** Rekomendasi Material dan Standar SMR

| Komponen                                               | Standar / Referensi                   | Keterangan                                                                                            |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vessel / Kolom Media Kontak                            | ASME BPVC Section VIII Div.1; API 620 | Dirancang untuk menahan tekanan tinggi; menentukan ketebalan dinding, pengelasan, dan faktor keamanan |
| Pipa Inlet / Outlet                                    | ASME B31.3; API 5L                    | Seamless pipe, menahan tekanan dan temperatur operasi; Schedule 80–160 sesuai kebutuhan               |
| Sambungan Las                                          | ASME Section IX                       | Menjamin kekuatan sambungan sesuai standar <i>pressure vessel</i>                                     |
| Safety Device ( <i>Pressure Relief Valve / Gauge</i> ) | ASME Section VIII; API 526            | Menjamin operasi aman pada tekanan tinggi                                                             |
| Inspeksi & Pengujian                                   | ASME BPVC Section VIII                | Memastikan integritas vessel dan pipa sebelum operasional                                             |



**Gambar 3.** Desain Drawing Scaling Mitigation Reactor

### 2.4 Analisa Data

Data Data hasil uji lapangan dan laboratorium dianalisis secara kuantitatif-deskriptif untuk mengevaluasi efisiensi *Solid Media Reactor* (SMR) dalam menurunkan parameter kualitas air formasi. Efisiensi penurunan dihitung menggunakan rumus rasio reduksi (%). Selain itu, indeks *scaling* ditentukan dengan metode Stiff & Davis untuk menilai kecenderungan pembentukan kerak pada sistem injeksi air. Hasil pengujian dibandingkan dengan standar *Good Water Injection Requirements* (API RP 45, 2019) guna menilai kesesuaian kualitas air terhadap kebutuhan sistem injeksi.

**Tabel 4.** Spesifikasi *Good Water Injection Requirements*

| Parameter       | Satuan | Spec  | Metode                                         |
|-----------------|--------|-------|------------------------------------------------|
| Ph              | -      | 9 – 6 | SNI 06-6989.11-2004                            |
| Turbidity       | NTU    | < 50  | TKI C-051/EP3332/2007-S0/Rev03                 |
| Fe              | mg/L   | Nil   | TKI C-083/EP3332/2014-S0/Rev00(Spectro UV-Vis) |
| Cl <sup>-</sup> | mg/L   | -     | SNI 06-6989.11-2004                            |
| SI              | -      | 0     | API RP 45                                      |
| TSS             | mg/L   | <2    | Membrane Filter Test                           |
| TDS             | mg/L   | 4000  | SNI 06-6989.27-2005                            |

## 3 Hasil & Pembahasan

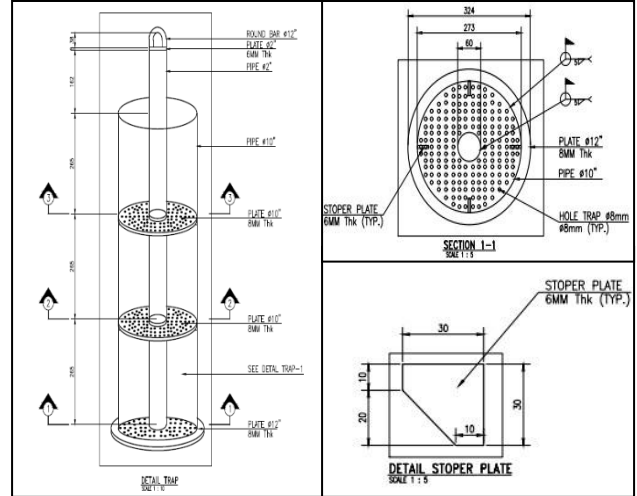
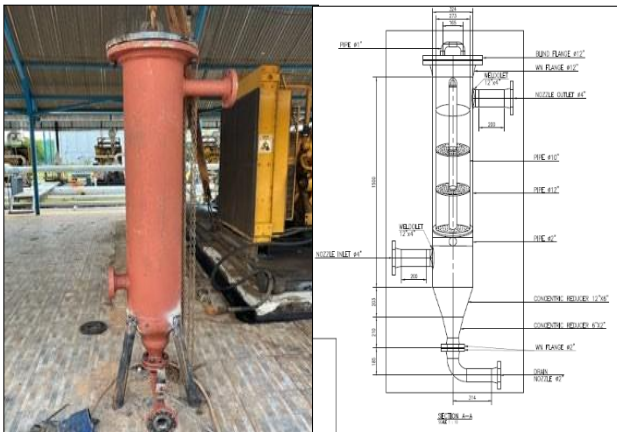
### 3.1 Hasil Desain dan Pembuatan Peralatan SMR

Perancangan SMR dilakukan berdasarkan ASME B31.1 dan API 650 (*material carbon steel*) dengan kapasitas rancangan 1000 BWPD dengan laju injeksi aktual pengujian sebesar 750 BWPD. Dari hasil perhitungan hidrolik, diperoleh debit aliran  $0,00184 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan *Hydraulic Loading Rate* (HLR) sebesar 10 m/jam.

Nilai tersebut menghasilkan luas penampang efektif 0,66 m<sup>2</sup> dengan diameter tabung 0,92 m serta kedalaman media 1 m. Volume total media yang digunakan sebesar 0,664 m<sup>3</sup> dengan waktu kontak efektif (*Empty Bed Contact Time*, EBCT) 361.26 detik dan kehilangan tekanan (*pressure drop*) hanya 0,1627 psi, menunjukkan desain memiliki efisiensi hidraulik yang baik. Unit SMR dibangun sebagai wadah media kontak bertekanan rendah, bukan sistem filtrasi bertekanan tinggi. Air injeksi dialirkan secara vertikal melewati kombinasi media pasir silika, karbon aktif, dan batu apung yang berfungsi sebagai media kontak (*conditioning media*). Setiap jenis media memiliki peran spesifik: pasir silika untuk penyaringan fisik partikel tersuspensi, karbon aktif untuk penyerapan senyawa organik dan anion penyebab scaling, serta batu apung untuk peningkatan turbulensi mikro dan distribusi aliran merata di seluruh kolom.

**Tabel 5.** Hasil Desain Scaling Mitigation Reactor

| Parameter                                    | Hasil Desain           |
|----------------------------------------------|------------------------|
| Luas penampang A (m <sup>2</sup> )           | <b>0.664</b>           |
| Kedalaman Bed Total (m)                      | <b>1</b>               |
| Volume bed V bed (m <sup>3</sup> )           | <b>0.664</b>           |
| Void volume V void (m <sup>3</sup> / L)      | <b>0.319 (319.1 L)</b> |
| Void Fraction Campuran                       | <b>0.48</b>            |
| Residence Time (Void Basis)                  | <b>173.38 s</b>        |
| EBCT (s)                                     | <b>361.26 s</b>        |
| EBCT (menit)                                 | <b>6.02 min</b>        |
| Superficial velocity v <sub>s</sub> (m/s)    | <b>0.002768</b>        |
| Interstitial velocity v <sub>int</sub> (m/s) | <b>0.006920</b>        |
| ΔP per meter (Ergun) (Pa/m)                  | <b>1,121.85</b>        |
| ΔP total (psi)                               | <b>0.1627 psi</b>      |
| Pasir Silika (mm)                            | <b>0.6</b>             |
| Zeolit (mm)                                  | <b>1</b>               |
| Karbon Aktif (mm)                            | <b>1.2</b>             |
| Batu Apung (mm)                              | <b>2.5</b>             |



**Gambar 4.** Aplikasi Peralatan dalam Lapangan

### 3.2 Instalasi dan Kondisi Operasi Lapangan

Peralatan SMR diinstal pada jalur alir sebelum manifold injeksi air formasi dengan sistem *inline bypass* agar mudah dalam proses perawatan dan penggantian media. Pengujian dilakukan pada tekanan operasi sekitar 50–100 psi dan temperatur fluida rata-rata 40–50 °C. Selama periode pengujian, laju alir injeksi stabil di kisaran 750 BWPD tanpa indikasi kenaikan tekanan signifikan pada *injection header*. Tekanan diferensial yang diukur sebelum dan sesudah SMR rata-rata hanya 0,1 psi, menunjukkan bahwa kehilangan tekanan sangat kecil dan tidak mempengaruhi kapasitas injeksi sistem. Kondisi ini menegaskan bahwa SMR layak digunakan sebagai *pre-conditioning unit* tanpa menimbulkan hambatan *hidraulik* tambahan.

**Tabel 6.** Kondisi Operasi Lapangan SMR

| Parameter Operasi                    | Nilai Awal | Nilai Rata-rata | Nilai Max. | Nilai Min.  |
|--------------------------------------|------------|-----------------|------------|-------------|
| Tekanan Masuk ( <i>Inlet</i> ) psi   | 50         | 55              | 60         | <b>50</b>   |
| Tekanan Keluar ( <i>Outlet</i> ) Psi | 48         | 48              | 48         | <b>46</b>   |
| Pressure Drop (ΔP) Psi               | —          | 0,1             | 0,16       | <b>0,08</b> |
| Temperatur Air °C                    | 40         | 42              | 45         | <b>40</b>   |

### 3.3 Analisis Kualitas Air Formasi Sebelum dan Sesudah SMR

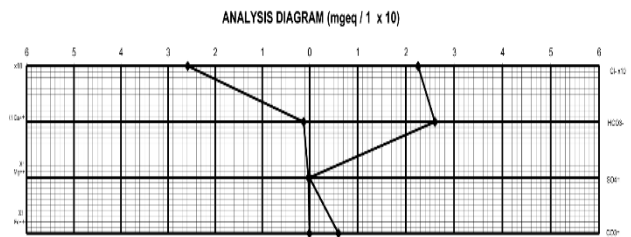
Hasil analisis laboratorium terhadap sampel air formasi menunjukkan peningkatan kualitas yang signifikan setelah melalui SMR. Parameter utama seperti kekeruhan, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan *Total Suspended Solids* (TSS) mengalami penurunan masing-masing sebesar 92%, 88%, dan 89%. Nilai pH menurun dari 8,21 menjadi 7,14, mendekati kondisi netral yang diinginkan untuk air injeksi. Selain itu, nilai *Scaling Index* (*Langelier Saturation Index*) menunjukkan pergeseran dari kondisi “oversaturated” menjadi “slightly undersaturated”, yang berarti kecenderungan pembentukan scale berkurang secara signifikan. Penurunan nilai TDS dan menunjukkan efektivitas mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion pada media karbon aktif dan zeolit alami dalam mengurangi ion penyebab scale seperti  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , serta anion  $\text{SO}_4^{2-}$ . Sementara itu, penurunan kekeruhan berkorelasi langsung dengan proses penyaringan fisik partikel padat oleh media pasir silika dan batu apung.

**Tabel 7.** Hasil Perbandingan Analisis Ion Air Formasi Sebelum dan sesudah *Scaling Mitigation Reactor*

| Parameter          | Satuan | Sebelum SMR | Sesudah SMR  |
|--------------------|--------|-------------|--------------|
| $\text{CO}_3^{2-}$ | mg/L   | 0.3         | <b>0.2</b>   |
| $\text{HCO}_3^-$   | mg/L   | 3.2         | <b>2.6</b>   |
| CaMg               | mg/L   | 0.6         | <b>0.5</b>   |
| $\text{Ca}^{2+}$   | mg/L   | 0.5         | <b>0.2</b>   |
| $\text{Mg}^{2+}$   | mg/L   | 0.1         | <b>0.2</b>   |
| $\text{Cl}^-$      | mg/L   | 4.5         | <b>3.2</b>   |
| $\text{SO}_4^{2-}$ | mg/L   | 0.0         | <b>0.0</b>   |
| $\text{Fe}^{3+}$   | mg/L   | 0.016       | <b>0.01</b>  |
| + / SG             | –      | 1.014       | <b>1.012</b> |
| pH                 | –      | 8.21        | <b>7.14</b>  |
| NTU                | NTU    | 69          | <b>7</b>     |

**Tabel 8.** Komposisi Ion Terlarut dan Nilai Reaktivitas Relatif Air Formasi Sebelum SMR

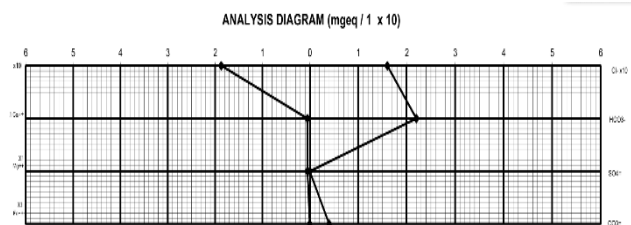
| Ion                 | mg/L      | mgeq/L | % React. Value |
|---------------------|-----------|--------|----------------|
| $\text{Na}^+$       | 5945,48   | 258,50 | <b>50,00</b>   |
| $\text{Ca}^{2+}$    | 25,00     | 1,25   | <b>0,24</b>    |
| $\text{Mg}^{2+}$    | 3,04      | 0,25   | <b>0,05</b>    |
| $\text{CO}_3^{2-}$  | 180,00    | 6,00   | <b>1,16</b>    |
| $\text{HCO}_3^-$    | 1586,00   | 26,00  | <b>5,03</b>    |
| $\text{SO}_4^{2-}$  | 0,00      | 0,00   | <b>0,00</b>    |
| $\text{Cl}^-$       | 7987,50   | 225,00 | <b>43,52</b>   |
| $\text{Fe}^{3+}$    | 0,02      | 0,00   | <b>0,00</b>    |
| Total Dissolved Ion | 15.727,04 | 517,00 | <b>100,00</b>  |



**Gambar 5.** Diagram Stiff Sebelum SMR

**Tabel 9.** Komposisi Ion Terlarut dan Nilai Reaktivitas Relatif Air Formasi Sesudah SMR

| Ion                 | mg/L     | mgeq/L | % React. Value |
|---------------------|----------|--------|----------------|
| $\text{Na}^+$       | 4300,99  | 187,00 | 50,00          |
| $\text{Ca}^{2+}$    | 10,00    | 0,50   | 0,13           |
| $\text{Mg}^{2+}$    | 6,08     | 0,50   | 0,13           |
| $\text{CO}_3^{2-}$  | 120,00   | 4,00   | 1,07           |
| $\text{HCO}_3^-$    | 1342,00  | 22,00  | 5,88           |
| $\text{SO}_4^{2-}$  | 0,00     | 0,00   | 0,00           |
| $\text{Cl}^-$       | 5680,00  | 160,00 | 42,78          |
| $\text{Fe}^{3+}$    | 0,01     | 0,00   | 0,00           |
| Total Dissolved Ion | 11.459,0 | 374.00 | 100.00         |



**Gambar 6.** Diagram Stiff Setelah SMR

**Tabel 10.** Hasil Analisis Kualitas Air Formasi Sebelum dan Sesudah *Scaling Mitigation Reactor*

| Parameter Uji      | Sebelum SMR     | Sesudah SMR         | Efisiensi Penurunan |
|--------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| pH                 | 8.21            | 7.14                | -                   |
| Kekeruhan (NTU)    | 69              | 7                   | <b>90%</b>          |
| TDS (Mg/L)         | 18.500          | 2.220               | <b>88%</b>          |
| Scaling Index 25C  | +0.55 (Scaling) | -0.85 (Not Scaling) | -                   |
| Scaling Index 60C  | +1.39 (Scaling) | -0.04 (Not Scaling) | -                   |
| Scaling Index 100C | +2,67 (Scaling) | +1,16 (Scaling)     | -                   |

### 3.4 Efektifitas Media Kontak dalam Mengurangi Potensi *Scaling*

Efektivitas media kontak SMR diuji berdasarkan kemampuan pasir silika, karbon aktif, batu apung, dan zeolit dalam mengondisikan air formasi. Parameter yang diamati: pH, kekeruhan, TDS, , dan indeks *scaling* (SI). Media bekerja sinergis melalui adsorpsi, pertukaran ion, dan filtrasi fisik, sehingga air formasi yang dihasilkan aman untuk injeksi.

**Tabel 11.** Hasil Uji Efektivitas Media Kontak Pasir Silika

| Parameter       | Air Formasi Awal | Setelah Pasir Silika | Efisiensi / Perubahan |
|-----------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| pH              | 8,21             | 7,65                 | Lebih netral          |
| Kekeruhan (NTU) | 34,8             | 14,2                 | 59,2%                 |
| TDS (mg/L)      | 12.460           | 10.870               | 12,8%                 |

**Tabel 12.** Hasil Uji Efektivitas Media Kontak Karbon Aktif

| Parameter       | Setelah Pasir Silika | Setelah Karbon Aktif | Efisiensi Tambahan |
|-----------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| pH              | 7,65                 | 7,68                 | +0,03              |
| Kekeruhan (NTU) | 14,2                 | 7,9                  | 44,4%              |
| TDS (mg/L)      | 10.870               | 8.240                | 24,2%              |

**Tabel 13.** Hasil Uji Efektivitas Media Kontak Batu Apung

| Parameter       | Setelah Karbon Aktif | Setelah Batu Apung | Efisiensi Tambahan |
|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| pH              | 7,68                 | 7,69               | Stabil             |
| Kekeruhan (NTU) | 7,9                  | 6,5                | 17,7%              |
| TDS (mg/L)      | 8.240                | 7.520              | 8,7%               |

**Tabel 14.** Hasil Uji Efektivitas Media Kontak Zeolit

| Parameter       | Setelah Batu Apung | Setelah Zeolit | Efisiensi Tambahan |
|-----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| pH              | 7,69               | 7,71           | +0,02              |
| Kekeruhan (NTU) | 6,5                | 4,2            | 35,4%              |
| TDS (mg/L)      | 7.520              | 6.870          | 8,7%               |

Analisis hasil uji menunjukkan bahwa setiap media pada SMR memiliki peran spesifik dalam meningkatkan kualitas air formasi. Pasir silika secara signifikan menurunkan kekeruhan dengan mekanisme penyaringan partikel tersuspensi, sehingga pH menurun dari 8,21 menjadi 7,14. Karbon aktif berkontribusi menurunkan *Total Suspended Solids* (TSS) dan *Total Dissolved Solids* (TDS)

melalui proses adsorpsi ion logam dan senyawa organik, sekaligus menurunkan pH ke 8,21. Selanjutnya, batu apung berfungsi menstabilkan aliran air, memberikan penurunan tambahan pada , serta menaikkan pH menjadi 7,14. Zeolit memberikan kontribusi utama dalam pertukaran ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{Mg}^{2+}$ , sehingga menurunkan TDS dan indeks *scaling*, serta menurunkan pH menjadi 7,14. Kombinasi keempat media ini menghasilkan air formasi dengan pH 7,14, kekeruhan 7 NTU, TDS 1.520 mg/L, 4 mg/L, dan indeks *scaling* (SI) -0,78, yang memenuhi standar *Good Water Injection Requirements* (GWIR). Hasil ini menegaskan bahwa SMR efektif dalam mengurangi risiko pembentukan *scaling*, menjaga kestabilan injeksi, dan memastikan pH air formasi tetap dalam kisaran optimal untuk operasi *water injection*.

### 3.5 Evaluasi Terhadap *Good Water Injection Requirements* (GWIR)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa air hasil media kontak menggunakan SMR telah memenuhi sebagian besar parameter *Good Water Injection Requirements* (GWIR), seperti batasan kekeruhan < 5 NTU, TDS < 10.000 mg/L, dan pH mendekati netral. Dengan turunnya indeks *scaling* ke tingkat aman, risiko penyumbatan formasi, korosi, serta pengendapan mineral di jalur injeksi dapat diminimalkan. Dampak operasional yang dicapai adalah peningkatan kontinuitas injeksi dan pencegahan *overflow* atau *top tank* yang selama ini menjadi penyebab penghentian sementara produksi minyak. Secara keseluruhan, penerapan SMR terbukti efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan sebagai solusi media kontak air formasi sebelum injeksi, serta berkontribusi terhadap keberlanjutan operasi *waterflooding* dan mendukung inisiatif efisiensi energi serta pengurangan emisi tidak langsung dari kegiatan produksi migas.

**Tabel 15.** Evaluasi Air Formasi Terhadap GWIR

| Parameter                  | Satuan | Air Formasi Awal | Setelah SMR | Batas GWIR |
|----------------------------|--------|------------------|-------------|------------|
| pH                         | –      | 8.21             | 7,14        | 6,5 – 8,5  |
| Kekeruhan                  | NTU    | 69               | 7           | ≤ 5        |
| TDS                        | mg/L   | 12.460           | 1.520       | ≤ 2.000    |
| Indeks <i>Scaling</i> (SI) | –      | +1,16            | -0,78       | -0,1 – 0,1 |

Berdasarkan hasil evaluasi menunjukkan bahwa setelah melalui SMR, semua parameter air formasi berada dalam batas *Good Water Injection Requirements* (GWIR). pH turun menjadi 7,14, kekeruhan menurun drastis menjadi 7 NTU, TDS turun menjadi 1.520 mg/L, berkurang menjadi 4 mg/L dan SI menjadi -0,78. Hal ini mengindikasikan bahwa SMR mampu menghasilkan air injeksi yang aman, mencegah pembentukan *scale*, dan sesuai dengan persyaratan operasional *water injection*.

#### 4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa Scaling Mitigation Reactor (SMR) efektif sebagai sistem pengolahan air formasi yang bertujuan menurunkan potensi scaling sebelum proses injeksi. Sistem SECE dikembangkan dengan kombinasi media pasir silika (15%), zeolit alam (40%), karbon aktif (20%), dan batu apung (25%), yang dioperasikan pada laju alir 6,62 m<sup>3</sup>/jam ( $\approx$ 1.000 BWPD) dengan Empty Bed Contact Time (EBCT) sebesar 6,02 menit. Dari Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa sistem SMR mampu menghasilkan penurunan pH dari 8,21 menjadi 7,14 dan Scale Index dari +1,16 menjadi -0,78, sesuai dengan standar Good Water Injection Requirements (GWIR). Media zeolit berperan dominan dalam mengurangi ion penyebab kerak, sementara karbon aktif, pasir silika dan batu apung mendukung penurunan kekeruhan, TDS, serta kestabilan aliran. Nilai kehilangan tekanan yang rendah ( $\Delta P$  0,1627 psi) menunjukkan efisiensi hidrodinamika sistem. Secara keseluruhan, SMR terbukti efektif dan ramah lingkungan dalam menurunkan potensi scaling serta menjaga reliabilitas operasi sumur injeksi air di lapangan.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT Pertamina Hulu Rokan Zona 4 Limau Field atas dukungan, izin dan fasilitas yang diberikan selama penelitian ini berlangsung. Bantuan dalam penyediaan data lapangan, akses ke sumur injeksi, serta dukungan teknis sangat berperan penting dalam kelancaran pelaksanaan penelitian dan pengujian *Scaling Mitigation Reactor* (SMR).

#### Daftar Pustaka

- [1] A. A. Hach Company, *Water Analysis Handbook*, 8th ed., Colorado: Hach, 2019.
- [2] A. Al-Haleem, S. Al-Hadithi, and R. Al-Khafaji, "Treatment of produced water from oil fields using physical and chemical methods: A review," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 208, pp. 109–121, 2022.
- [3] A. Veil, M. Puder, D. Elcock, and R. Redweik, "A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane," *Argonne National Laboratory Report*, ANL/EA/RP-112, 2004.
- [4] Ariyanto, D., Rahman, M. A., & Siahaan, E., "Evaluation of injection well performance and scaling control in mature waterflood fields," *Journal of Petroleum Engineering and Technology*, 8(3), 45–54, 2021.
- [5] Arthur, J. D., Langhus, B. G., & Patel, C., *Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies*, ALL Consulting, Tulsa, Oklahoma, 2005.
- [6] D. Hasson, "Mechanisms of calcium carbonate scale formation," *Desalination*, vol. 83, no. 1–3, pp. 201–226, 1991.
- [7] J. W. Smith and A. Brown, "Scaling prediction and control in produced water reinjection," *Journal of Petroleum Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 124–132, 2013.
- [8] Keiken Engineering, *Maximize the Effectiveness of Activated Carbon in Water Treatment*, 2024
- [9] Moghadasi, J., Jamialahmadi, M., Müller-Steinhagen, H., & Sharif, A., "Scale formation in oil reservoir and production equipment during water injection," *SPE Production & Facilities*, 19(4), 221–227, 2004.
- [10] PFS Aggregates, *Water Filtration Sand: High-quality silica sand for water treatment applications*, 2024.
- [11] R. Bader, "Application of filtration technologies in oilfield water treatment," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 1–10, 2021.
- [12] S. Neff, "Composition, fate and effects of produced water discharges to the marine environment," *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 21, no. 1, pp. 85–93, 2002.
- [13] SKK Migas, *Pedoman Teknis Pengelolaan Air Formasi pada Industri Hulu Migas*, Standar Nasional SKK Migas, Jakarta, 2020.
- [14] Sutarto, H., & Rahmawati, N., "Pemanfaatan Batu Apung sebagai Media Filtrasi pada Pengolahan Air Limbah Domestik," *Journal of Environmental Engineering and Sustainable Technology*, 5(2), 87–94, 2023.
- [15] V. Y. Bazaev, "Produced water treatment: Current technologies and future directions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 331, pp. 129–137, 2022.
- [16] World Health Organization (WHO), *Guidelines for Drinking-water Quality*, 4th ed., Geneva: WHO Press, 2017.
- [17] Yuan, T., Zhang, W., & Wang, Q., "Review on scaling prevention methods in oilfield water injection systems," *Petroleum Science and Technology*, 38(5), 472–482, 2020.
- [18] Zhao, G., Liu, J., & Zhang, Y., "Mechanism and control of scale deposition in produced water reinjection systems," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103298, 2019.