

Uji Laboratorium Efektivitas Scale Inhibitor Komersial *Phosponobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) Terhadap Scale CaCO_3 Pada Lapangan Migas

Idham Khalid^{1*}, Zulfikri Efendy Nasution², Fitrianti³.

^{1,2,3} Universitas Islam Riau, Pekanbaru, Indonesia.

*E-mail: khalididham@eng.uir.ac.id (CA)

Abstrak: Pembentukan *scale* kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi pada sistem produksi minyak dan gas bumi. Endapan *scale* dapat menyebabkan penyempitan aliran, penurunan laju produksi, peningkatan tekanan operasi, serta gangguan pada peralatan produksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) sebagai *scale inhibitor* komersial dalam mereduksi *scale* CaCO_3 pada skala laboratorium. Metode yang digunakan adalah metode perendaman dengan variasi konsentrasi PBTC sebesar 10%, 25%, 37,5%, dan 50% serta variasi waktu perendaman selama 60 menit, 120 menit, dan 180 menit. Sampel *scale* CaCO_3 yang digunakan memiliki massa awal 3 gram pada setiap perlakuan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai pH PBTC menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi, yaitu dari pH 5,4 pada konsentrasi 10% menjadi pH 2,7 pada konsentrasi 50%, sehingga menunjukkan sifat asam. Pengujian efektivitas menunjukkan bahwa PBTC mampu mereduksi massa *scale* CaCO_3 pada seluruh variasi konsentrasi dan waktu perendaman. Persentase reduksi terendah diperoleh pada konsentrasi PBTC 10% dengan waktu perendaman 60 menit sebesar 4,3%, sedangkan persentase reduksi tertinggi pada variasi perlakuan penelitian diperoleh pada konsentrasi PBTC 50% dengan waktu perendaman 180 menit sebesar 45,3%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi PBTC dan lamanya waktu perendaman meningkatkan efektivitas reduksi *scale* CaCO_3 . Dengan demikian, PBTC terbukti efektif digunakan sebagai *scale inhibitor* dalam mereduksi *scale* CaCO_3 pada pengujian laboratorium.

Kata Kunci: PBTC, *scale inhibitor*, CaCO_3 , reduksi *scale*, minyak dan gas bumi.

Sitasi: Khalid, I., Nasution, Z. E., & Fitrianti, F. (2026). Uji Laboratorium Efektivitas Scale Inhibitor Komersial *Phosponobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) Terhadap Scale CaCO_3 Pada Lapangan Migas. *Locus Journal of Academic Literature Review*, 5(8), 1224–1238. <https://doi.org/10.56128/ljoalr.v5i8.1161>

1. Pendahuluan

Dalam kegiatan produksi migas, berbagai permasalahan teknis sering ditemukan dan dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem produksi. Salah satu permasalahan yang paling umum terjadi adalah terbentuknya endapan mineral anorganik yang dikenal sebagai *scale*. *Scale* merupakan endapan padat yang terbentuk akibat presipitasi ion-ion terlarut dalam fluida produksi ketika terjadi perubahan kondisi fisik maupun kimia selama proses produksi. Endapan ini umumnya tersusun atas senyawa seperti kalsium

karbonat (CaCO_3), kalsium sulfat (CaSO_4), barium sulfat (BaSO_4), dan stronsium sulfat (SrSO_4). Di antara berbagai jenis *scale* tersebut, kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan salah satu jenis *scale* yang paling sering ditemukan pada lapangan migas (Alida & Fandra, 2018).

Pembentukan *scale* CaCO_3 dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti perubahan tekanan, suhu, pH, serta pencampuran air formasi dengan air injeksi yang memiliki karakteristik kimia berbeda. Perubahan kondisi tersebut menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan ion dalam larutan sehingga menghasilkan kondisi supersaturasi yang memicu terbentuknya kristal-kristal *scale* (Alighiri et al, 2018). Menurut Said dan Ahmad (2015), endapan *scale* yang terus terakumulasi dapat menempel pada dinding tubing, casing, *flowline*, separator, pompa bawah permukaan, maupun peralatan produksi lainnya. Akibatnya, diameter efektif aliran menjadi semakin kecil sehingga laju produksi menurun, tekanan operasi meningkat, dan efisiensi sistem produksi menjadi berkurang.

Salah satu *scale* inhibitor komersial yang banyak digunakan dalam industri migas adalah *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC). PBTC merupakan senyawa organofosfonat yang memiliki kemampuan tinggi dalam menghambat pembentukan *scale* kalsium karbonat melalui mekanisme pengikatan ion kalsium (Ca^{2+}), penghambatan pembentukan inti kristal (*nucleation inhibition*), serta penghambatan pertumbuhan kristal (*crystal growth inhibition*). Selain memiliki efektivitas yang tinggi, PBTC juga dikenal memiliki stabilitas termal yang baik, tahan terhadap kondisi operasi yang bervariasi, serta efektif digunakan pada konsentrasi yang relatif rendah dibandingkan beberapa inhibitor lainnya.

Penelitian mengenai pengendalian *scale* sebelumnya banyak difokuskan pada penggunaan inhibitor alami berbasis senyawa tanin, seperti ekstrak kulit rambutan, ekstrak kulit jengkol, maupun limbah ampas teh hijau yang dikombinasikan dengan asam galat. Meskipun bahan-bahan tersebut menunjukkan potensi sebagai bio-inhibitor, efektivitasnya masih dipengaruhi oleh variasi kandungan senyawa aktif, metode ekstraksi, dan stabilitas bahan selama penggunaan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang mengevaluasi efektivitas inhibitor komersial yang telah banyak digunakan di industri sehingga dapat diperoleh data yang lebih representatif terhadap kondisi operasional lapangan migas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menguji efektivitas *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) sebagai *scale inhibitor* komersial terhadap pembentukan *scale* CaCO_3 melalui pengujian laboratorium dengan variasi konsentrasi 10%, 25%, 37,5%, dan 50% pada volume larutan tetap 25 mL, serta variasi waktu perendaman 60 menit, 120 menit, dan 180 menit. Hasil penelitian ini diharapkan dapat

memberikan informasi mengenai pengaruh konsentrasi dan waktu perendaman PBTC terhadap kemampuan mereduksi pembentukan *scale* CaCO_3 , serta menentukan kondisi optimum penggunaan PBTC sehingga dapat menjadi referensi dalam upaya pengendalian *scale* pada lapangan migas secara lebih efektif dan efisien.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) sebagai *scale inhibitor* terhadap pembentukan *scale* kalsium karbonat (CaCO_3) menggunakan metode perendaman di Laboratorium Teknik Perminyakan Universitas Islam Riau. Pengujian dilakukan dengan variasi konsentrasi PBTC (10%, 25%, 37,5%, dan 50%) dalam volume larutan tetap 25 mL serta variasi waktu perendaman (60, 120, dan 180 menit) menggunakan bahan seperti PBTC, *scale*, dan aquadest, serta perangkat pendukung laboratorium meliputi timbangan digital, oven, dan pH meter. Data yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui pengaruh konsentrasi dan waktu terhadap kemampuan PBTC dalam mereduksi massa *scale* guna menentukan kondisi optimum pengendaliannya dalam sistem produksi migas.

3. Hasil & Pembahasan

3.1. Penyesuaian Konsentrasi Larutan Phosphonobutane Tricarboxylic Acid (PBTC)

Larutan *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan larutan stok dengan konsentrasi 50%. Untuk memperoleh variasi konsentrasi yang diinginkan, yaitu 10%, 25%, 37,5%, dan 50%, dilakukan proses pengenceran menggunakan akuades. Larutan PBTC dengan konsentrasi 50% digunakan secara langsung tanpa penambahan akuades, sedangkan konsentrasi 37,5%, 25%, dan 10% diperoleh dengan menambahkan akuades sesuai volume yang telah ditentukan.

Pada setiap perlakuan, volume larutan PBTC yang digunakan dipertahankan tetap sebanyak 25 mL. Variasi konsentrasi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi PBTC terhadap kemampuan inhibitor dalam mereduksi *scale* kalsium karbonat (CaCO_3). Komposisi larutan PBTC dan volume akuades yang ditambahkan pada setiap variasi konsentrasi disajikan pada

Tabel 1. Penyesuaian Konsentrasi Larutan PBTC

Konsentrasi PBTC	Larutan PBTC	Akuades Tambahan
50%	25 mL	0 mL
37,5%	25 mL	8,4 mL
25%	25 mL	25 mL
10%	25 mL	100 mL

Berdasarkan Tabel 3.3, variasi konsentrasi PBTC diperoleh melalui pengenceran larutan stok 50% dengan penambahan akuades sesuai kebutuhan. Larutan hasil pengenceran tersebut kemudian digunakan sebagai *scale inhibitor* pada pengujian perendaman dengan variasi waktu 60 menit, 120 menit, dan 180 menit untuk mengetahui pengaruh konsentrasi terhadap kemampuan PBTC dalam mereduksi *scale* CaCO_3 .

Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengujian berupa massa awal dan massa akhir *scale* setelah perendaman dalam larutan *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC). Data tersebut digunakan untuk menentukan besarnya reduksi *scale* yang terjadi pada masing-masing variasi waktu perendaman.

Persentase reduksi *scale* dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Reduksi Scale (\%)} = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100\% \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan:

- W_o = Massa awal *scale* (gram)
- W_t = Massa akhir *scale* setelah perendaman (gram)

Hasil perhitungan reduksi *scale* kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mengetahui pengaruh waktu perendaman terhadap kemampuan PBTC dalam mereduksi *scale* CaCO_3 .

Pengujian pH dilakukan untuk mengetahui tingkat keasaman larutan *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* atau PBTC sebelum digunakan sebagai inhibitor terhadap *scale* CaCO_3 . Pengujian ini menggunakan pH meter digital. Hasil pengujian pH PBTC ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian pH Inhibitor PBTC

Jenis Pereduksi	Metode	Nilai pH
<i>Phosponobutane Tricarboxylic Acid</i> (PBTC) 10%	pH Meter Digital	5.4
<i>Phosponobutane Tricarboxylic Acid</i> (PBTC) 25%	pH Meter Digital	4.7
<i>Phosponobutane Tricarboxylic Acid</i> (PBTC) 37,5%	pH Meter Digital	3.6
<i>Phosponobutane Tricarboxylic Acid</i> (PBTC) 50%	pH Meter Digital	2.7

Berdasarkan Tabel 4.1, nilai pH larutan PBTC mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya konsentrasi larutan. Larutan PBTC berkonsentrasi 10% memiliki nilai pH sebesar 5,4, sedangkan pada konsentrasi 25%, 37,5%, dan 50% nilai pH berturut-turut sebesar 4,7, 3,6, dan 2,7. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi PBTC, maka larutan menjadi semakin asam.

Sifat asam PBTC berperan penting dalam pengendalian *scale* CaCO_3 . Pada kondisi asam, konsentrasi ion H^+ yang lebih tinggi dapat membantu menghambat pembentukan kristal kalsium karbonat serta meningkatkan kelarutan endapan karbonat. Oleh karena itu, penurunan nilai pH pada konsentrasi PBTC yang lebih tinggi diperkirakan dapat meningkatkan efektivitas PBTC dalam mengendalikan pembentukan *scale* CaCO_3 . Dalam sistem produksi migas, pH merupakan salah satu faktor yang memengaruhi proses pembentukan *scale*, di mana kondisi dengan pH yang lebih tinggi cenderung mempercepat pengendapan kalsium karbonat, sedangkan kondisi yang lebih asam dapat menghambat pembentukan maupun membantu melarutkan endapan karbonat.

Hasil pengujian ini mendukung karakteristik PBTC sebagai *scale inhibitor* berbasis fosfonat yang bekerja melalui mekanisme pengikatan ion kalsium (*chelating*), penghambatan proses nukleasi, serta penghambatan pertumbuhan kristal CaCO_3 . Selain dipengaruhi oleh mekanisme tersebut, efektivitas PBTC juga didukung oleh sifat larutannya yang semakin asam pada konsentrasi yang lebih tinggi, sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan inhibitor dalam mereduksi pembentukan *scale*.

Secara teoritis, metode kimia merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam pengendalian *scale* karena bahan kimia dapat mencegah, menghambat, maupun membantu melarutkan endapan mineral pembentuk *scale*. Herawati dan Novrianti (2015) menjelaskan bahwa penggunaan larutan asam pada proses stimulasi *matrix acidizing* mampu membantu melarutkan dan menghilangkan *scale* pada formasi *sandstone*, sehingga hambatan aliran fluida dapat dikurangi. Oleh karena itu, karakteristik keasaman PBTC yang ditunjukkan pada hasil pengujian pH menjadi salah satu faktor yang mendukung penggunaannya sebagai *scale inhibitor* dalam pengendalian *scale* CaCO_3 .

3.2. Pengujian Inhibitor PBTC Terhadap Kemampuan Reduksi Scale CaCO_3

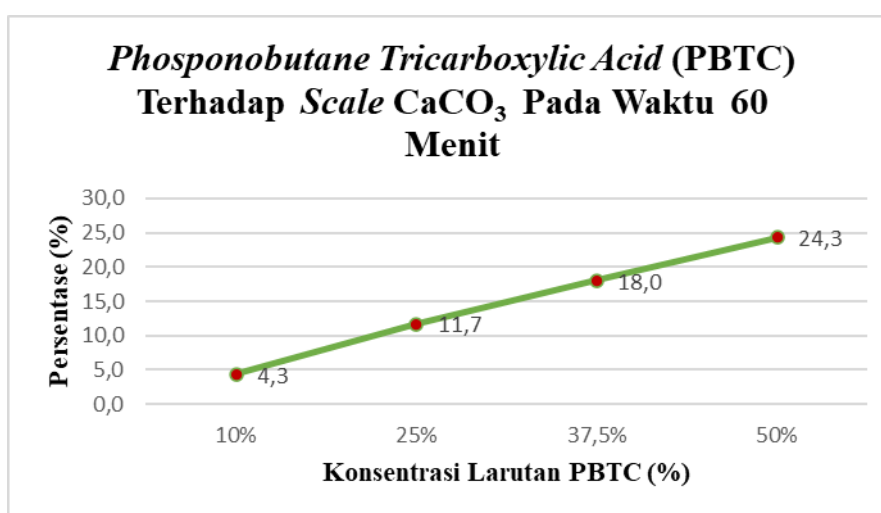
Pengujian efektivitas *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) dilakukan menggunakan metode perendaman terhadap sampel *scale* kalsium karbonat (CaCO_3). Sampel *scale* yang digunakan pada setiap perlakuan memiliki berat awal sebesar 3 gram. Larutan PBTC digunakan pada empat variasi konsentrasi, yaitu 10%, 25%, 37,5%, dan 50%, dengan volume larutan tetap 25 mL. Proses perendaman dilakukan dengan variasi waktu 60 menit, 120 menit, dan 180 menit. Setelah proses perendaman selesai,

sampel *scale* diangkat, dikeringkan hingga berat konstan, kemudian ditimbang kembali untuk memperoleh berat akhir. Selisih antara berat awal dan berat akhir digunakan untuk mengevaluasi efektivitas PBTC dalam mereduksi *scale* CaCO_3 .

Pengujian Inhibitor PBTC *Scale* CaCO_3 Pada Waktu 60 Menit

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Reduksi *Scale* CaCO_3 pada Waktu 60 Menit

Konsentrasi PBTC (%)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Berat Tereduksi (gr)	Persentase (%)
10	3	2,87	0,13	4,3
25	3	2,65	0,35	11,7
37,5	3	2,46	0,54	18,0
50	3	2,27	0,73	24,3



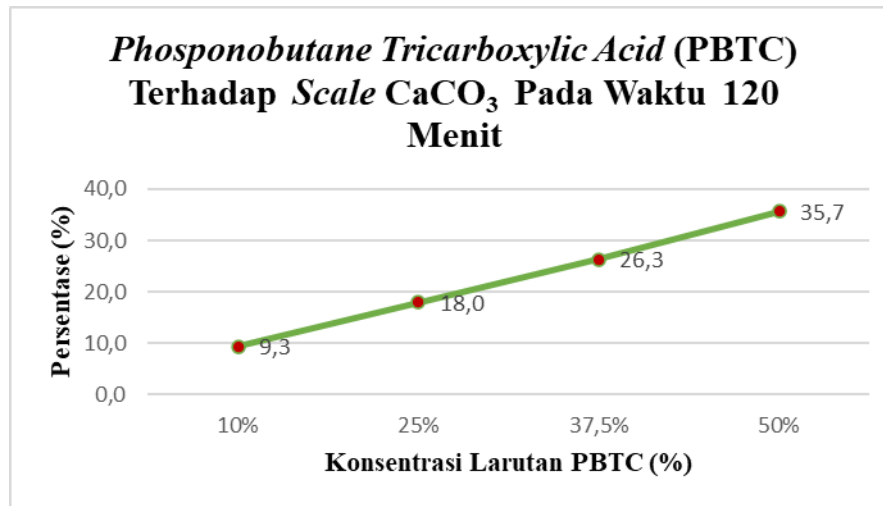
Gambar 1 Hasil Pengujian PBTC Waktu 60 Menit

Berdasarkan Tabel 4.2, hasil pengujian pada waktu perendaman 60 menit menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi *Phosponobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) meningkatkan kemampuan dalam mereduksi *scale* CaCO_3 . Massa *scale* yang tereduksi meningkat dari 0,13 gram (4,3%) pada konsentrasi 10% menjadi 0,73 gram (24,3%) pada konsentrasi 50%. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi PBTC, semakin besar kemampuan larutan dalam mereduksi *scale* CaCO_3 karena jumlah molekul inhibitor yang berinteraksi dengan permukaan *scale* dan ion Ca^{2+} semakin banyak. Mekanisme tersebut meliputi penghambatan nukleasi, penghambatan pertumbuhan kristal, serta pembentukan kompleks dengan ion kalsium (*chelating*). Hasil penelitian ini sejalan dengan Zuo *et al.* (2021) yang menyatakan bahwa PBTC efektif menghambat pembentukan *scale* kalsium karbonat dan menunjukkan efisiensi inhibisi yang lebih baik dibandingkan *1-Hydroxyethylidene-1,1-Diphosphonic Acid* (HEDP) pada kondisi tertentu.

Pengujian Inhibitor PBTC Scale CaCO_3 Pada Waktu 120 Menit

Tabel 3 Hasil Pengujian Reduksi Scale CaCO_3 pada Waktu 120 Menit

Konsentrasi PBTC (%)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Berat Tereduksi (gr)	Persentase (%)
10	3	2,72	0,28	9,3
25	3	2,46	0,54	18,0
37,5	3	2,21	0,79	26,3
50	3	1,93	1,07	35,7



Gambar 2 Hasil Pengujian PBTC Waktu 120 Menit

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil pengujian pada waktu perendaman 120 menit menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi *Phosponobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) memberikan peningkatan kemampuan dalam mereduksi scale CaCO_3 . Pada konsentrasi 10%, massa scale yang tereduksi sebesar 0,28 gram dengan persentase reduksi 9,3%. Ketika konsentrasi PBTC ditingkatkan menjadi 25%, massa scale yang tereduksi meningkat menjadi 0,54 gram dengan persentase reduksi 18,0%. Selanjutnya, pada konsentrasi 37,5%, massa scale yang tereduksi mencapai 0,79 gram dengan persentase reduksi 26,3%, sedangkan pada konsentrasi 50% diperoleh massa scale yang tereduksi sebesar 1,07 gram atau setara dengan persentase reduksi 35,7%.

Jika dibandingkan dengan hasil pengujian pada waktu perendaman 60 menit, seluruh variasi konsentrasi menunjukkan peningkatan massa scale yang tereduksi. Hal ini menunjukkan bahwa waktu perendaman berpengaruh terhadap efektivitas PBTC dalam mereduksi scale CaCO_3 . Semakin lama sampel scale direndam di dalam larutan PBTC, semakin besar peluang terjadinya interaksi antara molekul inhibitor dengan permukaan scale maupun ion Ca^{2+} yang terdapat pada endapan. Kondisi tersebut memungkinkan proses pembentukan kompleks (*chelating*), penghambatan nukleasi, serta pelemahan struktur kristal CaCO_3 berlangsung lebih optimal.

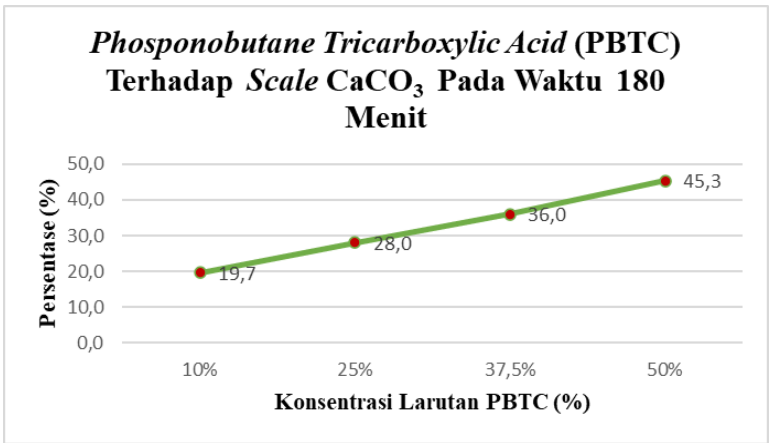
Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi antara peningkatan konsentrasi PBTC dan waktu perendaman yang lebih lama mampu meningkatkan efektivitas reduksi *scale* CaCO₃. Pada waktu perendaman 120 menit, konsentrasi PBTC sebesar 50% memberikan hasil terbaik dengan massa *scale* yang tereduksi sebesar 1,07 gram atau 35,7% dari massa awal. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan konsentrasi inhibitor yang diikuti dengan waktu kontak yang lebih lama dapat meningkatkan kinerja PBTC dalam mengendalikan *scale* CaCO₃.

Hasil tersebut sejalan dengan konsep kerja *scale inhibitor* yang bekerja melalui mekanisme penghambatan nukleasi, penghambatan pertumbuhan kristal, serta pembentukan kompleks dengan ion kalsium sehingga mengurangi pembentukan maupun keberadaan endapan mineral. Novrianti *et al.* (2025) menjelaskan bahwa penggunaan *scale inhibitor* pada sistem perpipaan mampu mengurangi massa endapan mineral sehingga hambatan aliran fluida dapat diminimalkan dan kinerja sistem produksi menjadi lebih optimal.

Pengujian Inhibitor PBTC *Scale* CaCO₃ Pada Waktu 180 Menit

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Reduksi *Scale* CaCO₃ pada Waktu 180 Menit

Konsentrasi PBTC (%)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Berat Tereduksi (gr)	Persentase (%)
10	3	2,41	0,59	19,7
25	3	2,16	0,84	28,0
37,5	3	1,92	1,08	36,0
50	3	1,64	1,36	45,3



Gambar 3 Hasil Pengujian PBTC Waktu 180 Menit

Berdasarkan Tabel 4.4, hasil pengujian pada waktu perendaman 180 menit menunjukkan kemampuan reduksi *scale* CaCO_3 yang lebih tinggi dibandingkan waktu perendaman 60 menit dan 120 menit. Pada konsentrasi *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) 10%, massa *scale* yang tereduksi sebesar 0,59 gram dengan persentase reduksi 19,7%. Ketika konsentrasi PBTC ditingkatkan menjadi 25%, massa *scale* yang tereduksi meningkat menjadi 0,84 gram dengan persentase reduksi 28,0%. Selanjutnya, pada konsentrasi 37,5%, massa *scale* yang tereduksi mencapai 1,08 gram dengan persentase reduksi 36,0%, sedangkan pada konsentrasi 50% diperoleh massa *scale* yang tereduksi sebesar 1,36 gram atau setara dengan persentase reduksi 45,3%.

Hasil tertinggi diperoleh pada perlakuan PBTC berkonsentrasi 50% dengan waktu perendaman 180 menit. Kondisi ini menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi inhibitor yang lebih tinggi dan waktu perendaman yang lebih lama menghasilkan kemampuan reduksi *scale* CaCO_3 yang paling optimal dalam penelitian ini. Persentase reduksi sebesar 45,3% menunjukkan bahwa hampir setengah dari massa awal *scale* mengalami penurunan setelah perlakuan menggunakan PBTC.

Jika dibandingkan dengan hasil pengujian pada waktu perendaman 60 menit dan 120 menit, seluruh variasi konsentrasi menunjukkan peningkatan massa *scale* yang tereduksi seiring bertambahnya waktu perendaman. Hal ini mengindikasikan bahwa waktu kontak antara PBTC dan *scale* CaCO_3 memberikan pengaruh terhadap efektivitas inhibitor. Semakin lama waktu perendaman, semakin besar peluang terjadinya interaksi antara molekul PBTC dengan permukaan *scale* maupun ion Ca^{2+} yang terdapat pada endapan, sehingga proses penghambatan kristalisasi dan pelemahan struktur kristal dapat berlangsung lebih optimal.

Secara mekanistik, hasil tersebut dapat dijelaskan melalui karakter PBTC sebagai inhibitor golongan organofosfonat. PBTC memiliki gugus fosfonat dan karboksilat yang mampu berinteraksi dengan ion kalsium melalui mekanisme pembentukan kompleks (*chelating*). Interaksi ini menurunkan ketersediaan ion Ca^{2+} bebas sehingga menghambat proses nukleasi, pertumbuhan kristal (*crystal growth inhibition*), serta menyebabkan perubahan bentuk kristal (*crystal distortion*). Selain itu, PBTC juga bekerja melalui mekanisme *threshold inhibition*, yaitu menghambat pembentukan endapan meskipun digunakan dalam konsentrasi yang relatif rendah.

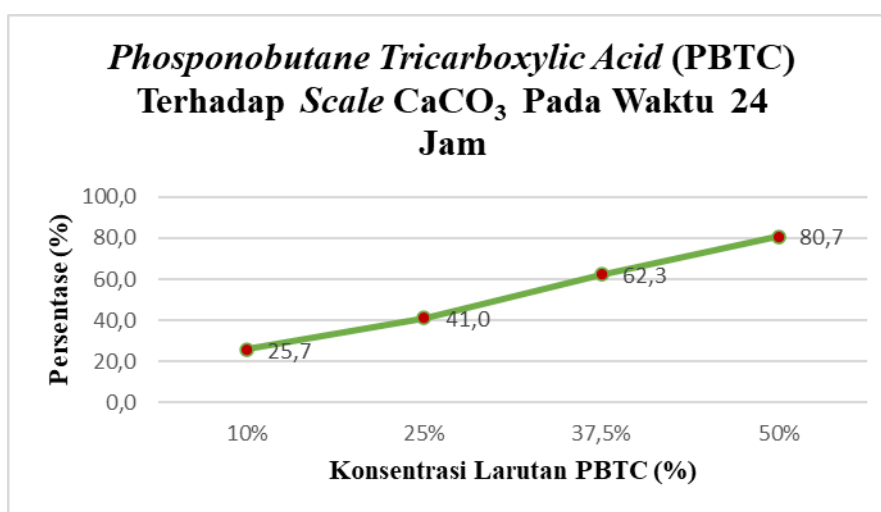
Musnal (2013) menjelaskan bahwa *scale* merupakan endapan yang terbentuk akibat proses kristalisasi ion-ion mineral terlarut ketika senyawa pembentuk kerak melebihi batas kelarutannya pada kondisi kesetimbangan. Oleh karena itu, penurunan massa *scale* yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa PBTC mampu menghambat pertumbuhan kristal dan mengurangi kestabilan endapan CaCO_3 yang telah terbentuk. Hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa PBTC berpotensi

digunakan sebagai *scale inhibitor* yang efektif dalam pengendalian *scale* kalsium karbonat pada sistem produksi migas.

Pengujian Inhibitor PBTC *Scale* CaCO₃ Pada Waktu Maksimal

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Reduksi *Scale* CaCO₃ pada Waktu Maksimal

Konsentrasi PBTC (%)	Berat Awal (gr)	Berat Akhir (gr)	Berat Tereduksi (gr)	Persentase (%)
10	3	2,23	0,77	25,7
25	3	1,77	1,23	41,0
37,5	3	1,13	1,87	62,3
50	3	0,58	2,42	80,7



Gambar 4 Hasil Pengujian PBTC Waktu Maksimal

Berdasarkan Tabel 4.5, kondisi waktu maksimal ditetapkan selama 24 jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) meningkatkan efektivitas reduksi *scale* CaCO₃. Pada konsentrasi 10%, massa *scale* yang tereduksi sebesar 0,77 gram dengan persentase reduksi 25,7%. Pada konsentrasi 25%, massa *scale* yang tereduksi meningkat menjadi 1,23 gram dengan persentase reduksi 41,0%. Selanjutnya, pada konsentrasi 37,5%, massa *scale* yang tereduksi mencapai 1,87 gram dengan persentase reduksi 62,3%, sedangkan pada konsentrasi 50% diperoleh massa *scale* yang tereduksi sebesar 2,42 gram dengan persentase reduksi 80,7%.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi PBTC yang digunakan, semakin besar kemampuan inhibitor dalam mereduksi *scale* CaCO₃. Selain itu, waktu perendaman yang lebih lama memberikan kesempatan yang lebih besar bagi PBTC untuk berinteraksi dengan endapan CaCO₃, sehingga proses reduksi *scale* berlangsung lebih efektif.

3.3. Analisis Hasil Reduksi Scale Menggunakan Inhibitor PBTC

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) mampu mereduksi massa *scale* CaCO_3 pada seluruh variasi konsentrasi dan waktu perendaman yang digunakan. Persentase reduksi terendah diperoleh pada konsentrasi PBTC 10% dengan waktu perendaman 60 menit, yaitu sebesar 4,3%. Berdasarkan variasi waktu perendaman yang ditetapkan dalam penelitian, persentase reduksi tertinggi diperoleh pada konsentrasi PBTC 50% dengan waktu perendaman 180 menit, yaitu sebesar 45,3%. Selain itu, dilakukan pengamatan hingga waktu maksimal selama 24 jam sebagai pengamatan tambahan untuk mengetahui perkembangan kinerja PBTC setelah waktu perendaman utama.

Scale CaCO_3 merupakan salah satu permasalahan penting dalam sistem produksi migas. Endapan ini dapat menyebabkan penyempitan diameter aliran, penurunan produktivitas sumur, peningkatan tekanan operasi, serta gangguan pada peralatan produksi. Dalam penelitian ini, *scale* CaCO_3 dijelaskan sebagai endapan mineral yang terbentuk akibat perubahan kondisi fisik dan kimia fluida produksi, terutama perubahan pH, suhu, tekanan, serta kesetimbangan ion dalam fluida. Oleh karena itu, pengendalian *scale* perlu dilakukan agar sistem produksi tetap berjalan secara efektif.

Berdasarkan hasil pengujian, PBTC mampu menurunkan massa *scale* secara bertahap. Pada waktu perendaman 60 menit, persentase reduksi *scale* berada pada rentang 4,3% hingga 24,3%. Pada waktu perendaman 120 menit, persentase reduksi meningkat menjadi 9,3% hingga 35,7%. Selanjutnya, pada waktu perendaman 180 menit, persentase reduksi kembali meningkat menjadi 19,7% hingga 45,3%. Pola tersebut menunjukkan bahwa semakin lama waktu perendaman, semakin besar massa *scale* CaCO_3 yang dapat direduksi oleh PBTC.

Jika dilihat dari rata-rata reduksi berdasarkan variasi waktu perendaman, pada waktu 60 menit diperoleh rata-rata reduksi sebesar 14,6%, kemudian meningkat menjadi 22,3% pada waktu 120 menit dan 32,3% pada waktu 180 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan waktu perendaman memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efektivitas PBTC dalam mereduksi *scale* CaCO_3 .

Peningkatan konsentrasi PBTC juga menunjukkan pengaruh positif terhadap hasil reduksi. Pada waktu perendaman 60 menit, peningkatan konsentrasi dari 10% menjadi 50% meningkatkan persentase reduksi dari 4,3% menjadi 24,3%. Pada waktu 120 menit, persentase reduksi meningkat dari 9,3% menjadi 35,7%. Pada waktu 180 menit, persentase reduksi meningkat dari 19,7% menjadi 45,3%. Dengan demikian, semakin tinggi konsentrasi PBTC yang digunakan, semakin besar pula kemampuan larutan tersebut dalam mereduksi *scale* CaCO_3 .

Sebagai pengamatan tambahan, dilakukan evaluasi hingga waktu maksimal selama 24 jam untuk mengetahui perkembangan kinerja PBTC setelah waktu perendaman utama. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa persentase reduksi *scale* meningkat hingga berada pada rentang 25,7% hingga 80,7%. Pengamatan ini tidak termasuk dalam variasi perlakuan penelitian, melainkan digunakan sebagai batas pengamatan untuk melihat perkembangan efektivitas PBTC dalam mereduksi *scale* CaCO_3 setelah waktu perendaman 180 menit.

Secara kimia, efektivitas PBTC terhadap *scale* CaCO_3 dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme utama. Pertama, PBTC dapat mengikat ion Ca^{2+} sehingga peluang terbentuknya kristal CaCO_3 menjadi lebih kecil. Kedua, PBTC dapat menghambat pertumbuhan kristal yang sudah mulai terbentuk (*crystal growth inhibition*). Ketiga, PBTC dapat mengubah bentuk atau morfologi kristal (*crystal distortion*), sehingga endapan menjadi lebih lemah dan lebih mudah tereduksi. Mekanisme ini sejalan dengan penelitian Zuo *et al.* (2021), yang menjelaskan bahwa PBTC efektif dalam menghambat pembentukan *scale* kalsium karbonat dan memiliki performa yang baik pada kondisi optimum.

Hasil penelitian ini juga mendukung pendapat Novrianti *et al.* (2025), yang menjelaskan bahwa *scale inhibitor* berperan penting dalam menurunkan massa endapan pada sistem aliran agar fluida tetap dapat mengalir dengan baik. Meskipun jenis inhibitor yang digunakan dalam penelitian tersebut berbeda, prinsip dasarnya tetap relevan, yaitu inhibitor digunakan untuk menekan akumulasi endapan mineral pada sistem produksi.

Berdasarkan hasil pengujian, kondisi optimum pada variasi perlakuan penelitian diperoleh pada konsentrasi PBTC 50% dengan waktu perendaman 180 menit. Pada kondisi tersebut, massa awal *scale* sebesar 3 gram berkurang menjadi 1,64 gram, sehingga massa *scale* yang tereduksi sebesar 1,36 gram dengan persentase reduksi 45,3%. Adapun hasil pengamatan hingga waktu maksimal selama 24 jam menunjukkan bahwa proses reduksi masih terus berlangsung, sehingga massa *scale* yang tereduksi meningkat menjadi 2,42 gram dengan persentase reduksi 80,7%. Namun, hasil tersebut merupakan pengamatan tambahan dan tidak digunakan sebagai dasar penentuan kondisi optimum dalam penelitian ini.

Dengan demikian, PBTC dapat dinyatakan efektif sebagai inhibitor terhadap *scale* CaCO_3 pada pengujian laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi PBTC dan lamanya waktu perendaman mampu meningkatkan kemampuan inhibitor dalam mereduksi massa *scale* CaCO_3 . Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada skala laboratorium. Pengujian lanjutan perlu mempertimbangkan kondisi lapangan yang lebih representatif, seperti temperatur operasi, salinitas air formasi, tekanan sistem, laju alir fluida, komposisi ion,

serta kompatibilitas PBTC dengan bahan kimia produksi lainnya.

4. Penutup

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *Phosphonobutane Tricarboxylic Acid* (PBTC) memiliki sifat asam dengan nilai pH yang menurun seiring meningkatnya konsentrasi, yaitu dari pH 5,4 pada konsentrasi 10% menjadi pH 2,7 pada konsentrasi 50%. Sifat asam tersebut mendukung kemampuan PBTC sebagai *scale inhibitor* dalam mereduksi *scale* kalsium karbonat (CaCO_3). Hasil pengujian menunjukkan bahwa PBTC mampu mereduksi massa *scale* CaCO_3 pada seluruh variasi konsentrasi dan waktu perendaman yang digunakan. Persentase reduksi terendah diperoleh pada konsentrasi PBTC 10% dengan waktu perendaman 60 menit sebesar 4,3%, sedangkan persentase reduksi tertinggi pada variasi perlakuan penelitian diperoleh pada konsentrasi PBTC 50% dengan waktu perendaman 180 menit sebesar 45,3%. Selain itu, rata-rata persentase reduksi juga mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu perendaman, yaitu dari 14,6% pada 60 menit menjadi 22,3% pada 120 menit dan 32,3% pada 180 menit. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa peningkatan konsentrasi PBTC dan lamanya waktu perendaman memberikan pengaruh terhadap efektivitas reduksi *scale* CaCO_3 . Dengan demikian, PBTC terbukti efektif digunakan sebagai *scale inhibitor* dalam mereduksi *scale* CaCO_3 pada skala laboratorium dan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu menganalisis pengaruh variasi konsentrasi PBTC dan waktu perendaman terhadap efektivitas reduksi *scale* CaCO_3 .

Referensi

- Ahmad, N. M., & Said, L. (2015). Analisa Air Formasi Dalam Menentukan Kecendrungan Pembentukan *Scale* Pada Sumur X, Y dan Z. *Seminar Nasional Cendekiawan*, 317–325.
- Alida, R., & Fandra, P. (2018). Penanggulangan *scale* CaCO_3 pada sumur pf1 lapangan 26 di pt pertamina ep asset 2 field limau. *Jurnal Teknik Patra Akademika*, 09(02).
- Alighiri, D., Fatmala, C., Syafiâ, I., & Haditya, E. B. (2018). Studi Pembentukan *Scale* CaCO_3 dan CaSO_4 pada Air Formasi Sumur Minyak di Cepu, Indonesia. *Jurnal Fisika*, 8(1).
- Azizah, A. N., Ichwanuddin, I., & Marfu'ah, N. (2020). Aktivitas Antibakteri Ekstrak Etanol Teh Hijau (*Camellia Sinensis*) Terhadap Pertumbuhan *Staphylococcus epidermidis*. *Pharmasipha*, 4(2), 15-23.
- Chung, K. T., Wong, T. Y., Wei, C. I., Huang, Y. W., & Lin, Y. (1998). Tannins and human health: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 38(6), 421–464.
- Demadis, K. D., & Lykoudis, P. (2005). Chemistry of Organophosphonate *Scale* Growth Inhibitors: 3. Physicochemical Aspects of 2-Phosphonobutane-1, 2, 4-

- Tricarboxylate (PBTC) And Its Effect on CaCO_3 Crystal Growth. *Bioinorganic chemistry and applications*, 3(3-4), 135-149.
- Demadis, K. D., Raptis, R. G., & Baran, P. (2005). Chemistry of Organophosphonate Scale Growth Inhibitors: 2. Structural Aspects of 2-Phosphonobutane-1, 2, 4-Tricarboxylic Acid Monohydrate (PBTC. H_2O). *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 3(3-4), 119-134.
- Desi, S. A. (2006). Fenomena kerak dalam desalinasi dengan multi stage flash distillation (MSF). *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 08(01).
- Donachy, J. E., & Sikes, C. S. (1994). *Thermal polycondensation synthesis of biomimetic serine-containing derivatives of polyaspartate: Potent inhibitors of calcium carbonate and phosphate crystallization*. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 32(4), 789-795.
- Firdaus, F., Afifah, R. S., Laby, D. A., Rohani, A., Kurniawan, Y. D., Rahmawati, S. D., & Darmiyati, I. (2023). Evaluation And Planning of Acidizing Method to Resolve Scale Issues In Well" YDK-01,"" Sandy" Field. *Citizen: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, 3(4), 304-313.
- F. (2001). *Silybin, a new iron-chelating agent*. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 85(2-3), 123-129.
- Halimatuddahlia. (2003). Pencegahan Korosi dan Scale Pada Proses Produksi Minyak Bumi. *USU Digital Library*, 1-8.
- Herawati, I., & Novrianti, N. (2015). *Evaluasi Peningkatan Produksi Pada Formasi Sandstone Sumur #H dan #P Dengan Perencanaan Stimulasi Pengasaman Matriks*. *Journal of Earth Energy Engineering*, 4(2), 1-14. DOI: 10.22549/jeee.v4i2.634.
- Ituen, E. B., & Ime-sunday, J. I. (2017). *Inhibition of oilfield scales using plant materials : A peep into green future*. 5(February), 284-292.
- Jafar Mazumder, M. A. (2020). A review of green scale inhibitors: Process, types, mechanism and properties. *Coatings*, 10(10), 1-29.
- Khormali, A., Petrakov, D. G., & Moein, M. J. A. (2016). Experimental analysis of calcium carbonate scale formation and inhibition in waterflooding of carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147, 843-850.
- Ma'mun, H., Bayuseno, A. P., & Muryanto, S. (2013). Pembentukan kerak kalsium karbonat (CaCO_3) di dalam pipa beraliran laminar pada laju alir 30 ml/menit hingga 50 ml/menit dan penambahan aditif asam malat. *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi*, 1(1)
- Mardina, P., Prathama, H. A., & Hayati, D. M. (2014). Pengaruh waktu hidrolisis dan konsentrasi katalisator asam sulfat terhadap sintesis furfural dari jerami padi. *Konversi*, 3(2), 1-8.
- Matar, M., Osman, H., Georgy, M., Abou-Zeid, A., & El-Said, M. (2017). A systems engineering approach for realizing sustainability in infrastructure projects. *HBRC journal*, 13(2), 190-201.

- Munir, R. (2025). *Studi Laboratorium Pengaruh Tanin Ekstrak Biji Pinang (areca Catechu L) Terhadap Pengurangan Scale Pada Flowline Sumur Minyak Bumi* (Skripsi, Universitas Islam Riau).
- Musnal, A. (2013). Mengatasi Kerusakan Formasi Dengan Metoda Pengasaman Yang Kompetibel Pada Sumur Minyak di Lapangan X. *Journal of Earth Energy Engineering*, 2(2), 1–7. DOI: 10.22549/jeee.v2i2.933.
- Musmuliadi. (2020). Scale pada pipa produksi area minas dengan injeksi chemical scale inhibitor. *Teknik Mesin*, 7(1), 69–76.
- Nadapdap, A. K. (2024). Analisis Variasi Waktu Perendaman Dan Variasi Volume Aditif Scale Inhibitor Daun Gambir Dan Edta 2na Terhadap Reduksi Optimum Scale Caco3.
- Novrianti, Hidayat, T., Purnamawati, N., & Fikri, M. R. (2025). *Comparative Performance Analysis of Natural Fruit Peel Extract and NazEDTA As Environmentally Friendly Scale Inhibitors in Tubular Systems*. Scientific Contributions Oil and Gas, 48(2), 329–345. DOI: 10.29017/scog.v48i2.1813.
- Oviedo, C., & Rodríguez, J. (2003). EDTA: *The chelating agent under environmental scrutiny*. Quimica Nova, 26(6), 901–905.
- Rahmadan, S. (2021). Analisis Pengaruh Tanin Ekstrak Kulit Rambutan Terhadap Scale Pada Flowline Sumur Migas, Universitas Islam Riau.
- Syahri, M., & Sugiarto, B. (2008). Scale treatment pada pipa *distribusi crude oil* secara kimiawi. In *Prosiding Seminar Nasional Teknoin*. H₂SO₄. *Pentana: Jurnal Penelitian Terapan Kimia*, 1(1), 52-60.
- Zhang, H., Jiang, M., Wu, Y., Li, L., Wang, Z., Wang, R., & Zhou, G. (2021). Development of completely furfural-based renewable polyesters with controllable properties. *Green Chemistry*, 23(6), 2437-2448.
- Zuo, Y., Sun, Y., Yang, W., Zhang, K., Chen, Y., Yin, X., & Liu, Y. (2021). Performance and mechanism of 1-hydroxy ethylidene-1, 1-diphosphonic acid and 2-phosphonobutane-1, 2, 4-tricarboxylic acid in the inhibition of calcium carbonate scale. *Journal of Molecular Liquids*, 334, 116093.
