

## KARAKTERISASI KITOSAN DARI KULIT UDANG SEBAGAI BIOPOLIMER RAMAH LINGKUNGAN UNTUK APLIKASI *ENHANCED OIL RECOVERY*

Muhammad Syaiful Nur Ma'arif<sup>1\*</sup>, Muhammad Rizqie Fathan Rahman<sup>1</sup>, Baiq Maulinda Ulfah<sup>1</sup>,  
Abdi Suprayitno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Perminyakan, STT MIGAS BALIKPAPAN

\*E-mail: Syaifularif593@gmail.com

### ABSTRACT

*The present study investigates the potential of shrimp shell waste as a biopolymer for Enhanced Oil Recovery (EOR) in cases where the salt content of the oil is high. A series of experimental studies was conducted, utilising a range of concentrations of chitosan 5,000–15,000 mg/L in conjunction with 10,000 and 20,000 mg/L NaCl solutions. The assessment of the stability and interaction of the polymer with porous media was conducted through the utilisation of compatibility tests, UV-Vis spectrophotometry-based concentration analysis, and batch system adsorption tests on 40 mesh silica sand media. The outcomes of the study demonstrated that all solutions maintained clarity without the formation of precipitates up to a salinity of 20,000 mg/L, indicating high stability in a strong ionic environment. The adsorption capacity exhibited an upward trend with increasing both concentration and salinity, reaching a maximum value of 14.13 mg/g at a concentration of 20,000 mg/L NaCl. This increase is due to electrostatic interactions between the amine groups of the chitosan and the silica surface, enhanced by Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> ions. In conclusion, chitosan possesses considerable potential as an environmentally friendly, stable biopolymer for sustainable EOR applications.*

**Keywords:** Chitosan, Enhanced Oil Recovery, Biopolymer, Adsorption, Salinity

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi perilaku kitosan hasil ekstraksi limbah kulit udang sebagai biopolimer alternatif untuk aplikasi *green* Enhanced Oil Recovery (EOR) pada kondisi salinitas tinggi. Studi eksperimental dilakukan menggunakan variasi konsentrasi kitosan 5.000–15.000 mg/L yang dicampurkan dengan larutan NaCl 10.000 dan 20.000 mg/L. Uji kompatibilitas, analisis konsentrasi berbasis spektrofotometri UV-Vis, serta uji adsorpsi *batch system* pada media pasir silika 40 mesh digunakan untuk menilai stabilitas dan interaksi polimer terhadap media berpori. Hasil menunjukkan bahwa seluruh larutan tetap jernih tanpa pembentukan endapan hingga salinitas 20.000 mg/L, menandakan stabilitas tinggi terhadap lingkungan ionik kuat. Kapasitas adsorpsi meningkat seiring kenaikan konsentrasi dan salinitas, dengan nilai maksimum 14,13 mg/g pada kondisi 20.000 mg/L NaCl. Peningkatan ini dikaitkan dengan mekanisme interaksi elektrostatik antara gugus amina kitosan dan permukaan silika, diperkuat oleh efek *charge screening* ion Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>. Secara keseluruhan, kitosan menunjukkan potensi tinggi sebagai biopolimer ramah lingkungan yang stabil untuk aplikasi EOR berkelanjutan.

**Kata kunci:** Kitosan, Enhanced Oil Recovery, Biopolimer, Adsorpsi, Salinita

## PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi (migas) global tengah menghadapi tantangan signifikan berupa penurunan laju produksi alamiah (*declining production rate*) serta meningkatnya tekanan regulasi lingkungan. Dalam konteks tersebut, teknologi *Enhanced Oil Recovery* (EOR) menjadi strategi penting untuk memperpanjang umur *reservoir* sekaligus meningkatkan faktor perolehan minyak yang diinginkan. Selama beberapa dekade, praktik EOR masih banyak bergantung pada polimer sintesis seperti *partially hydrolyzed polyacrylamide* (HPAM) dan surfaktan kimia. Meskipun efektif, material tersebut dikritik karena tidak mudah terurai di lingkungan (*non-biodegradable*), berpotensi menimbulkan efek toksik, serta memerlukan biaya tinggi relatif tinggi (Muhammed et al., 2020; Tackie-Otoo et al., 2020). Seiring meningkatnya kesadaran terhadap aspek keberlanjutan, arah penelitian kini bergeser pada konsep *Green EOR (GEOR)*, yaitu pemanfaatan material alami yang ramah lingkungan namun tetap mampu efektif dalam kondisi *reservoir* (Haq et al., 2022; Kothawade et al., 2025).

Salah satu biopolimer yang mendapat perhatian luas adalah kitosan, hasil deasetilasi dari kitin yang banyak terkandung dalam limbah kulit udang (Boominathan & Sivaramakrishna, 2021). Sebagai negara maritim, Indonesia menghasilkan limbah perikanan dalam jumlah besar yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Konversi limbah tersebut menjadi kitosan tidak hanya mendukung konsep *circular economy*, tetapi juga menghasilkan polimer alami yang *biodegradable*, tidak beracun, serta memiliki kompatibilitas tinggi dengan kondisi *reservoir* (Gopal et al., 2019; Setiati et al., 2021).

Awalnya kitosan lebih banyak digunakan dalam bidang pangan, kesehatan, dan pengolahan lingkungan, namun kajian terkini menunjukkan potensinya dalam sektor energi. Sifat khas kitosan memiliki kemampuan meningkatkan viskositas larutan, menekan mobilitas air, dan berinteraksi dengan media berpori melalui mekanisme adsorpsi (Liu & Lai, 2019; Sakthivel et al., 2024).

Sejumlah penelitian mutakhir juga mendukung potensi kitosan untuk digunakan dalam sistem EOR. Sakthivel et al. (2024) melaporkan bahwa kitosan larut air menunjukkan performa baik di *reservoir* karbonat yang kompleks, sementara Ulfah et al. (2024) menegaskan prospek kitosan sebagai biopolimer alternatif dengan efektivitas yang sebanding dengan polimer sintesis. Hasil eksperimen di Indonesia pun memperlihatkan bahwa kitosan dari limbah udang dan kepiting menunjukkan stabilitas tinggi pada berbagai kondisi salinitas, dengan perilaku adsorpsi yang mengikuti model isoterm Langmuir maupun Freundlich, bergantung pada lingkungan ionik *reservoir* (Ulfah et al., 2024).

Meski demikian, terdapat dua tantangan utama yang masih membatasi implementasi kitosan pada skala lapangan. Pertama, stabilitas larutan pada kondisi salinitas tinggi, sebab air formasi yang kaya garam dapat menurunkan viskositas polimer. Kedua, karakteristik adsorpsi kitosan pada batuan reservoir, karena tingkat adsorpsi yang terlalu tinggi berpotensi mengurangi efektivitas polimer akibat jumlah yang tersisa di dalam fluida injeksi berkurang (Sakthivel et al., 2024). Hal ini menunjukkan perlunya kajian lebih sistematis mengenai perilaku kitosan pada kondisi reservoir yang berbeda untuk memastikan kelayakan dan konsistensinya sebagai agen injeksi EOR (Hamid et al., 2025; Ulfah et al., 2023).

Sejalan dengan ketergantungan industri migas pada polimer sintetis seperti polyacrylamide (HPAM) yang berbasis minyak bumi, tidak berkelanjutan, sensitif terhadap salinitas tinggi, dan memiliki masalah lingkungan akibat biodegradabilitas rendah, penelitian ini mengangkat potensi kitosan hasil ekstraksi limbah kulit udang. Minimnya studi komprehensif mengenai karakterisasi kitosan khususnya untuk aplikasi EOR, baik dari segi performa dalam kondisi salinitas tinggi, stabilitas dalam sistem brine, maupun kompatibilitas dengan media batuan, menjadi celah penelitian yang hendak diisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi sifat fisiko-kimia kitosan, mengevaluasi kompatibilitas larutan kitosan pada berbagai tingkat salinitas (10.000-20.000 ppm), menganalisis stabilitas rheological sebagai fluida injeksi, serta menilai potensi aplikasinya dalam meningkatkan efisiensi penyapuan minyak dan mengurangi rasio mobilitas air-minyak di reservoir. Dengan fokus ini, penelitian diharapkan memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi EOR berbasis biopolimer yang efisien secara teknis, berkelanjutan secara lingkungan, dan ekonomis bagi industri migas nasional.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini merupakan studi eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Sekolah Tinggi Teknologi Migas Balikpapan dan Laboratorium Institut Teknologi Kalimantan. Material utama yang digunakan adalah kitosan hasil ekstraksi dari limbah kulit udang dengan variasi konsentrasi larutan 5.000, 10.000, dan 15.000 mg/L. Untuk mensimulasikan kondisi reservoir, larutan kitosan dicampurkan dengan NaCl pada salinitas 10.000 dan 20.000 mg/L. Sementara itu, pasir silika 40 mesh digunakan sebagai media berpori untuk mewakili karakteristik batuan reservoir.

Uji kompatibilitas dilakukan dengan mengamati kestabilan larutan terhadap pembentukan endapan dan perubahan warna selama periode 24 jam, guna menilai stabilitas fisik kitosan di

lingkungan salin. Uji adsorpsi dilakukan dengan metode *batch system*, dimana sebanyak 60 gram pasir silika 40 mesh dicampur dengan 100 mL larutan kitosan (rasio solid/liquid = 1:1,67 g/mL) dalam gelas beaker. Campuran dikontakkan selama 24 jam pada suhu ruang dengan pengadukan konstan menggunakan *magnetic stirrer* hingga tercapai kesetimbangan adsorpsi. pH larutan tidak dikontrol selama eksperimen dan diukur pada kondisi alami.

Setelah periode kontak, larutan dipisahkan dari pasir dan konsentrasi akhir dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis berdasarkan kurva standar hubungan antara konsentrasi dan absorbansi. Data hasil eksperimen kemudian dianalisis untuk menentukan kapasitas adsorpsi. Dengan pendekatan ini, penelitian memberikan dasar ilmiah bagi pemanfaatan kitosan sebagai biopolimer ramah lingkungan dalam aplikasi *Enhanced Oil Recovery* (EOR), sehingga mendukung pengembangan teknologi EOR yang lebih berkelanjutan.

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil kajian eksperimental yang dikembangkan dari penelitian sebelumnya terkait karakterisasi kitosan berbasis limbah kulit udang. Serangkaian pengujian dilakukan untuk menilai stabilitas larutan pada kondisi salinitas tinggi, mengukur konsentrasi dengan metode spektrofotometri UV-Vis, serta mengamati perilaku adsorpsi kitosan melalui sistem batch pada media pasir silika. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman awal mengenai kelayakan kitosan sebagai biopolimer ramah lingkungan pada kondisi reservoir yang menantang. Uraian hasil penelitian disusun secara bertahap, dimulai dari uji kompatibilitas, dilanjutkan dengan validasi analisis konsentrasi, dan ditutup dengan pembahasan mengenai adsorpsi pada media berpori.

### 1. Kompatibilitas Kitosan pada Air Bersalinitas Tinggi

Uji kompatibilitas menunjukkan bahwa larutan kitosan dengan konsentrasi 5.000, 10.000, dan 15.000 mg/L tetap jernih dan tidak membentuk endapan ketika dicampurkan dengan larutan NaCl bersalinitas 10.000 mg/L maupun 20.000 mg/L. Hasil ini konsisten pada seluruh variasi konsentrasi sebagaimana diamati secara visual yang mengindikasikan tidak terjadinya koagulasi maupun presipitasi akibat interaksi ionik antara gugus amina kitosan dan ion  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ . Stabilitas visual tersebut memperlihatkan bahwa kitosan mampu mempertahankan integritas strukturnya dalam lingkungan ionik tinggi, suatu karakteristik yang tidak selalu dimiliki oleh polimer sintesis seperti HPAM yang cenderung mengalami penurunan viskositas pada kondisi serupa (Muhammed

et al., 2020; Tackie-Otoo et al., 2020).



**Gambar 1.** Sampel larutan kitosan udang dengan NaCl 10.000 ppm



**Gambar 2.** Sampel larutan kitosan udang dengan NaCl 20.000 ppm

Meskipun pengamatan dilakukan secara kualitatif, tidak ditemukan indikasi perubahan warna maupun peningkatan viskositas yang berarti selama proses pencampuran. Pengamatan dilakukan segera setelah pencampuran larutan untuk mengevaluasi kompatibilitas awal. Namun, pengujian lanjutan dengan parameter kuantitatif seperti pH, turbidity, dan viskositas sebelum–sesudah pencampuran, serta uji stabilitas jangka panjang (aging test) selama 24–168 jam, direkomendasikan agar dapat memvalidasi kestabilan larutan secara lebih komprehensif. Data tersebut akan memperkuat interpretasi bahwa kitosan memiliki stabilitas fisik dan kimia yang baik pada media bersalinitas tinggi, sehingga menjadikannya kandidat potensial dalam aplikasi green polymer EOR pada reservoir dengan kadar garam tinggi.

## 2. Validasi Analisis Konsentrasi dengan spektrofotometri UV-Vis

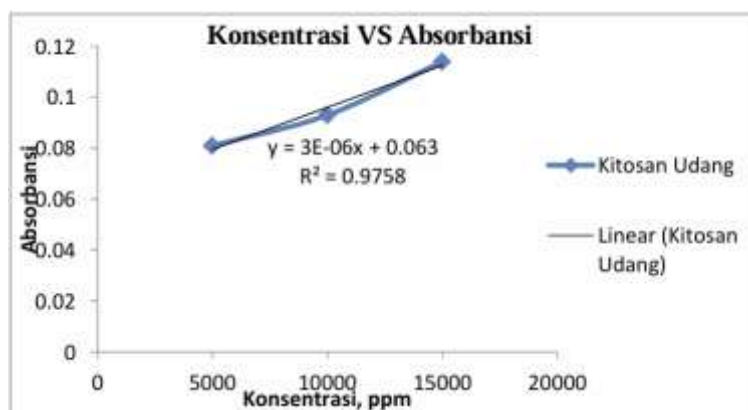
Analisis konsentrasi kitosan dilakukan menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis. Dua seri larutan standar terpisah disiapkan untuk masing-masing salinitas (10.000 dan 20.000 mg/L NaCl) guna memastikan akurasi kalibrasi pada kondisi ionik yang berbeda. Data absorbansi larutan standar (Tabel 1) menunjukkan tren peningkatan absorbansi yang konsisten seiring

bertambahnya konsentrasi kitosan, membuktikan adanya hubungan linear yang kuat. Pada salinitas 10.000 mg/L, absorbansi meningkat dari 0,081 (5.000 mg/L) menjadi 0,114 (15.000 mg/L), sedangkan pada salinitas 20.000 mg/L, absorbansi naik dari 0,088 menjadi 0,104 untuk rentang konsentrasi yang sama.

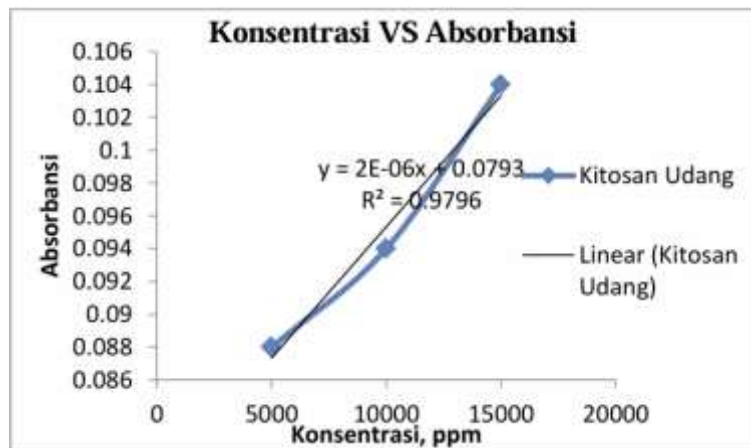
**Tabel 1.** Absorbansi kitosan udang dengan NaCl

| No | Kode Larutan                  | Salinitas (mg/L) | Konsentrasi (mg/L) | Absorbansi |
|----|-------------------------------|------------------|--------------------|------------|
| 1  | N <sub>1</sub> U <sub>1</sub> | 10000            | 5000               | 0,831      |
| 2  | N <sub>1</sub> U <sub>2</sub> | 10000            | 10000              | 0,093      |
| 3  | N <sub>1</sub> U <sub>3</sub> | 10000            | 15000              | 0,114      |
| 4  | N <sub>2</sub> U <sub>1</sub> | 20000            | 5000               | 0,088      |
| 5  | N <sub>2</sub> U <sub>2</sub> | 20000            | 10000              | 0,094      |
| 6  | N <sub>2</sub> U <sub>3</sub> | 20000            | 15000              | 0,104      |

Hubungan linear ini kemudian dikonfirmasi melalui kurva kalibrasi pada Gambar 3 (salinitas 10.000 mg/L) dan Gambar 4 (salinitas 20.000 mg/L). Persamaan regresi untuk salinitas 10.000 mg/L adalah  $y = 3 \times 10^{-6}x + 0,063$  ( $R^2 = 0,9758$ ), sementara untuk salinitas 20.000 mg/L adalah  $y = 2 \times 10^{-6}x + 0,0793$  ( $R^2 = 0,9796$ ). Perbedaan slope pada kedua persamaan ini mengonfirmasi pengaruh salinitas terhadap respons absorbansi, dimana lingkungan ionik yang lebih tinggi menyebabkan sensitivitas deteksi yang sedikit berbeda (Józwiak et al., 2019).



**Gambar 3.** Kurva standar kitosan udang dengan NaCl 10000 ppm.



**Gambar 4.** Kurva standar kitosan udang dengan NaCl 20000 ppm.

Nilai  $R^2 > 0,97$  pada kedua kondisi salinitas menunjukkan tingkat linearitas yang tinggi, membuktikan keandalan metode spektrofotometri UV-Vis untuk mengkuantifikasi kitosan dalam rentang salinitas yang diteliti. Koefisien korelasi setinggi ini diakui sebagai indikator kunci dari kalibrasi yang kuat dan terpercaya dalam validasi metode analitik untuk biopolimer (Xue et al., 2024). Validasi ini menjadi fondasi kritis bagi keakuratan perhitungan kapasitas adsorpsi pada tahap selanjutnya, sebuah prinsip yang juga ditegaskan dalam studi-studi adsorpsi yang menggunakan kitosan (Benazouz et al., 2025).

### 3. Adsorpsi Kitosan pada Media Silika

Hasil uji adsorpsi batch system yang ditampilkan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi kitosan pada pasir silika 40 mesh dipengaruhi oleh konsentrasi larutan polimer dan salinitas air formasi. Secara umum, peningkatan konsentrasi kitosan dari 5.000 menjadi 15.000 mg/L menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi dari 1,67 hingga 10,83 mg/g pada salinitas 10.000 mg/L NaCl. Pada salinitas lebih tinggi (20.000 mg/L NaCl), nilai adsorpsi meningkat signifikan hingga 14,13 mg/g. Tren ini menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal larutan, semakin banyak molekul kitosan (solute) yang tersedia untuk menempel pada permukaan padatan (Francis et al., 2021). Sementara itu, peningkatan salinitas menyebabkan penurunan viskositas larutan, sehingga mobilitas molekul meningkat dan difusi menuju permukaan adsorben menjadi lebih efisien (Yang et al., 2021). Selain itu, ukuran butiran pasir yang relatif kecil (40 mesh) juga memperluas luas permukaan kontak, memperkuat proses penyerapan molekul kitosan (Fathaddin et al., 2020).

**Tabel 2.** Hasil adsorpsi kitosan udang dengan NaCl.

| No | Kode Larutan                  | Salinitas (mg/L) | Konsentrasi (mg/L) | Konsentrasi akhir (mg/L) | Adsorpsi        |
|----|-------------------------------|------------------|--------------------|--------------------------|-----------------|
|    |                               |                  |                    | Setelah 40 Mesh          | Setelah 40 Mesh |
| 1  | N <sub>1</sub> U <sub>1</sub> | 10000            | 5000               | 4333,33                  | 1,67            |
| 2  | N <sub>1</sub> U <sub>2</sub> | 10000            | 10000              | 7000                     | 7,50            |
| 3  | N <sub>1</sub> U <sub>3</sub> | 10000            | 15000              | 10666,67                 | 10,83           |
| 4  | N <sub>2</sub> U <sub>1</sub> | 20000            | 5000               | 1350                     | 9,13            |
| 5  | N <sub>2</sub> U <sub>2</sub> | 20000            | 10000              | 4850                     | 12,88           |
| 6  | N <sub>2</sub> U <sub>3</sub> | 20000            | 15000              | 9350                     | 14,13           |

#### 4. Isoterm Adsorpsi

**Tabel 3.** Nilai konstanta untuk model Langmuir dan Freundlich.

| Model      | Konstanta | 10000 ppm   | 20000 ppm   |
|------------|-----------|-------------|-------------|
| Langmuir   | M         | -3,01659    | 15,45595    |
|            | K         | -0,00008512 | 0,001065757 |
| Freundlich | K         | 4,41469E-08 | 1,738201018 |
|            | 1/n       | 2,1023      | 0,2317      |

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian isoterm adsorpsi kitosan udang pada media pasir 40 mesh dengan variasi salinitas, dapat dianalisis mekanisme adsorpsi yang terjadi. Nilai konstanta Freundlich K diperoleh yaitu sebesar 4,41469E-08 pada 10000 ppm dan 1,738201018 pada 20000 ppm, di mana hasil konstanta ini meningkat seiring dengan meningkatnya salinitas yang digunakan. Peningkatan nilai K ini mengindikasikan bahwa lingkungan ionik yang lebih tinggi secara efektif meningkatkan afinitas adsorpsi kitosan pada permukaan silika melalui mekanisme enhanced electrostatic interactions and charge screening effects (Mehri et al., 2022). Sementara nilai 1/n yang diperoleh, yaitu 2,1023 pada salinitas 10.000 ppm dan 0,2317 pada 20.000 ppm, mengungkapkan perubahan mendasar dalam mekanisme adsorpsi. Nilai  $1/n < 1$  pada salinitas tinggi (0,2317) mengonfirmasi adsorpsi yang menguntungkan (*favorable*) pada permukaan yang heterogen, yang konsisten dengan pembentukan lapisan *multilayer* (Na, 2020). Sebaliknya, nilai  $1/n > 1$  pada salinitas rendah (2,1023) mengindikasikan kondisi adsorpsi yang kurang menguntungkan (*unfavorable*) akibat perubahan afinitas permukaan dalam lingkungan ionik yang lebih rendah (Tran et al., 2021). Temuan ini sejalan dengan penelitian (Kekes et al., 2021) yang

menyatakan bahwa nilai  $n > 1$  pada model Freundlich menunjukkan proses adsorpsi fisika yang didominasi oleh gaya van der Waals, yang implikasinya terhadap efektivitas adsorpsi adalah terbentuknya lapisan multilayer yang meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan, serta menciptakan kondisi adsorpsi yang spontan dan eksotermik. Hal ini diperkuat oleh penelitian (Nurfarhana et al., 2025) yang melaporkan bahwa nilai  $n > 1$  pada sistem adsorpsi karbon berpori menghasilkan peningkatan kapasitas adsorpsi CO<sub>2</sub> melalui mekanisme fisika yang efektif.

Pada nilai konstanta Langmuir  $M = 15,46595$  pada 20000 ppm di mana mengindikasikan kapasitas adsorpsi maksimum yang cukup tinggi. Transisi mekanisme adsorpsi dari multilayer ke monolayer seiring peningkatan salinitas dapat dijelaskan melalui teori screening effect menurut penelitian (Luo et al., 2025), dimana ion Na<sup>+</sup> dari garam NaCl berperan dalam mereduksi tolakan elektrostatik antar molekul kitosan, sehingga memfasilitasi pembentukan lapisan monolayer yang lebih stabil.

**Tabel 4.** AARE dan R<sup>2</sup> untuk model Langmuir dan Freundlich.

| Salinitas | Parameter Statistik | Langmuir | Freundlich |
|-----------|---------------------|----------|------------|
| 10000 ppm | AARE (%)            | -466,023 | -2,749     |
|           | R <sup>2</sup>      | 0,346    | 0,854      |
| 20000 ppm | AARE (%)            | 0,014    | -0,006     |
|           | R <sup>2</sup>      | 0,999    | 0,976      |

Berdasarkan parameter statistik, model Freundlich pada salinitas 10.000 mg/L memiliki AARE -2,749%, sementara model Langmuir pada salinitas 20.000 mg/L menunjukkan AARE 0,014%. Nilai AARE yang mendekati nol pada model Langmuir mengkonfirmasi akurasi model yang sangat baik dalam memprediksi perilaku adsorpsi pada kondisi salinitas tinggi.

Dari perspektif energi adsorpsi, nilai R<sup>2</sup> 0,999 pada model langmuir di salinitas 20000 ppm menunjukkan kesesuaian sempurna dengan karakteristik adsorpsi monolayer (Compton et al., 2025; Yue et al., 2025). Fenomena ini disebabkan efek screening ion Na<sup>+</sup> yang menetralkan muatan permukaan pasir dan mengubah konformasi molekul kitosan menjadi lebih teratur, sehingga memfasilitasi pembentukan lapisan tunggal yang homogen. Sebaliknya, pada salinitas 10.000 ppm dengan model Freundlich (R<sup>2</sup> 0,854), konsentrasi ion yang belum optimal memungkinkan terbentuknya adsorpsi multilayer melalui interaksi elektrostatik yang tidak homogen (Hekiem et al., 2022).

Perbedaan mekanisme adsorpsi ini memiliki implikasi langsung terhadap aplikasi EOR. Pada reservoir bersalinitas tinggi, model Langmuir memungkinkan perhitungan kapasitas adsorpsi maksimum yang akurat untuk optimasi volume injeksi kitosan. Sementara untuk reservoir bersalinitas rendah, model Freundlich memberikan panduan dalam mendesain formulasi yang mampu membentuk lapisan multilayer untuk coverage yang lebih luas pada permukaan batuan reservoir.

## 5. Implikasi terhadap Aplikasi EOR

Kombinasi hasil dari uji kompatibilitas, validasi analisis konsentrasi, dan uji adsorpsi memperlihatkan bahwa kitosan memiliki dua keunggulan utama: pertama larutan tetap stabil hingga salinitas 20.000 mg/L NaCl, tanpa menunjukkan pembentukan endapan maupun perubahan warna. Kedua perilaku adsorpsi kitosan bersifat dapat diprediksi dan terkendali, sebagaimana dibuktikan oleh konsistensi hubungan antara konsentrasi awal dan kapasitas adsorpsi. Hasil ini memberikan kontribusi unik yang membedakan penelitian ini dengan literatur sebelumnya, di mana banyak biopolimer dilaporkan kehilangan stabilitas pada kondisi ionik tinggi (Sakthivel et al., 2024; Liu & Lai, 2019). Dengan demikian, penelitian ini menutup *research gap* mengenai keterbatasan biopolimer alami pada kondisi reservoir kompleks.

Selain itu, sifat kitosan yang biodegradable, non-toksik, dan berbasis limbah perikanan mendukung prinsip *circular economy*, menjadikannya solusi ramah lingkungan dibandingkan polimer sintesis seperti HPAM (García-Castrillo et al., 2024; Periyannan et al., 2023). Oleh karena itu, data eksperimental yang ditunjukkan dapat menjadi landasan ilmiah penting untuk penelitian lanjutan. Pada akhirnya akan menentukan kelayakan kitosan sebagai agen injeksi polimer dalam sistem EOR berkelanjutan.

## KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa kitosan hasil ekstraksi limbah kulit udang memiliki stabilitas tinggi pada media bersalinitas hingga 20.000 mg/L NaCl tanpa pembentukan endapan atau degradasi visual, menandakan kompatibilitas yang baik terhadap lingkungan ionik tinggi. Analisis spektrofotometri UV-Vis ( $R^2 > 0,97$ ) memvalidasi keakuratan pengukuran konsentrasi, sedangkan uji adsorpsi menunjukkan peningkatan kapasitas hingga 14,13 mg/g pada salinitas tinggi. Analisis isoterm menunjukkan kesesuaian dengan model Freundlich pada 10.000 mg/L dan Langmuir pada 20.000 mg/L, menandakan transisi dari adsorpsi multilayer ke monolayer akibat

efek *charge screening* ion  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ . Hasil ini menegaskan potensi kitosan sebagai biopolimer ramah lingkungan yang stabil dan efektif untuk aplikasi *Enhanced Oil Recovery (EOR)* berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Benazouz, K., Bouchelkia, N., Moussa, H., Boutheldja, R., Zamouche, M., Amrane, A., Parvathiraja, C., Al-Lohedan, H. A., Bollinger, J.-C., & Mouni, L. (2025). Efficient Removal of Cu(II) from Wastewater Using Chitosan Derived from Shrimp Shells: A Kinetic, Thermodynamic, Optimization, and Modelling Study. *Water*, 17(6), 851. <https://doi.org/10.3390/w17060851>
- Boominathan, T., & Sivaramakrishna, A. (2021). Recent Advances in the Synthesis, Properties, and Applications of Modified Chitosan Derivatives: Challenges and Opportunities. *Topics in Current Chemistry*, 379(3), 19. <https://doi.org/10.1007/s41061-021-00331-z>
- Compton, D., Chiu, N.-C., Stylianou, K. C., & Stadie, N. P. (2025). The Temperature Dependence of the Langmuir Adsorption Model for a Single-Site Metal–Organic Framework. *Langmuir*, 41(16), 10639–10646. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.5c00757>
- dos Santos Francisco, A. D., Maia, K. C. B., Moura, J. G. V., Nascimento, R. S. V., da Silva Lima, F., & Grasseschi, D. (2023). Chitosan derivatives as surfactant carriers for enhanced oil recovery – Experimental and molecular dynamic evaluations of polymer-surfactant interactions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 671, 131644. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131644>
- Fathaddin, M. T., Hartono, K. F., & Kartoatmodjo, T. (2020). Study of Polymer Flooding Behavior in Heterogeneous Two-Layered Porous Media. *Journal of Earth Energy Science, Engineering, and Technology*, 3(1). <https://doi.org/10.25105/jeeset.v3i1.6679>
- Francis, A. O., Ahmad Zaini, M. A., Zakaria, Z. A., Muhammad, I. M., Abdulsalam, S., & El-Nafaty, U. A. (2021). Equilibrium and kinetics of phenol adsorption by crab shell chitosan. *Particulate Science and Technology*, 39(4), 415–426. <https://doi.org/10.1080/02726351.2020.1745975>
- García-Castrillo, M., Barandika, G., & Lizundia, E. (2024). Low Environmental Impact Magnetic

- Chitosan and Chitin Cryogels for PFAS Remediation. *Advanced Functional Materials*, 34(46). <https://doi.org/10.1002/adfm.202405298>
- Gopal, J., Muthu, M., Dhakshanamurthy, T., Kim, K. J., Hasan, N., Kwon, S. J., & Chun, S. (2019). Sustainable ecofriendly phytoextract mediated one pot green recovery of chitosan. *Scientific Reports*, 9(1), 13832. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50133-z>
- Hamid, M., Dayana, I., Sholeha, D., Siregar, M. F., Roza, I., Junaidi, Rianna, M., & Wijoyo, H. (2025). Eco-friendly utilization of chitosan from shrimp shells for used lubricating oil cleaning. *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100368. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100368>
- Haq, B., Aziz, M. A., Al Shehri, D., Muhammed, N. S., Basha, S. I., Hakeem, A. S., Qasem, M. A. A., Lardhi, M., & Iglauer, S. (2022). Date-Leaf Carbon Particles for Green Enhanced Oil Recovery. *Nanomaterials*, 12(8), 1245. <https://doi.org/10.3390/nano12081245>
- Hekiem, N. L. L., Md Ralib, A. A., Mohd Hatta, M. A., Ahmad, F. B., & Za'bah, N. F. (2022). Study of adsorption isotherms in the detection of acetone and isopropyl alcohol using QCM sensor with chitosan sensing layer. *2022 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, 29–32. <https://doi.org/10.1109/ICSE56004.2022.9863136>
- Józwiak, T., Filipkowska, U., Bolozan, L., & Gache, L. (2019). THE INFLUENCE OF SALINITY ON REACTIVE BLACK 5 DYE SORPTION EFFICIENCY ON HYDROGEL CHITOSAN SORBENTS. *Progress on Chemistry and Application of Chitin and Its Derivatives, XXIV*, 49–60. <https://doi.org/10.15259/PCACD.24.004>
- Kekes, T., Tsakanika, L., Kolliopoulos, G., & Tzia, C. (2021). Adsorption of Indigo Carmine onto Chitosan - Cerium Oxide Nanobiosorbent: Adsorption Isotherms, Kinetics, and Thermodynamics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 690(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/690/1/012048>
- Kothawade, T. R., Deshmukh, M., Kumar, G., Pathan, A., & Sangwai, J. (2025). Harnessing biochemical innovations for sustainable oil recovery: perspectives from the Indian context on green enhanced oil recovery (GEOR) methods for matured petroleum fields. *Environmental*

*Science and Pollution Research*, 32(13), 7894–7932. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36207-8>

Liu, Y., & Lai, N. (2019). Synthesis and Properties of Branched Polymer Based on Modified Chitosan for Enhanced Oil Recovery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 267(2), 022038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/2/022038>

Luo, S., Misra, R. P., Sam, A., Frömbgen, T., Kirchner, B., & Blankschtein, D. (2025). Explicit Modeling of Electronic Polarization Reveals Water-Mediated Screening of Ion Adsorption at Hexagonal Boron Nitride Interfaces. *ACS Nano*, 19(30), 27500–27514. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5c06456>

Mehri, M., Fallah, N., & Nasernejad, B. (2022). Influence of salinity on heavy metal and oil removal from hypersaline oilfield-produced water by electrocoagulation: mechanistic insights. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(16), 23619–23638. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17253-4>

Muhammed, N. S., Haq, M. B., Al-Shehri, D., Rahaman, M. M., Keshavarz, A., & Hossain, S. M. Z. (2020). Comparative Study of Green and Synthetic Polymers for Enhanced Oil Recovery. *Polymers*, 12(10), 2429. <https://doi.org/10.3390/polym12102429>

Na, C. (2020). Size-Controlled Capacity and Isocapacity Concentration in Freundlich Adsorption. *ACS Omega*, 5(22), 13130–13135. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01144>

Nurfarhana, M. M., Asikin-Mijan, N., Yusoff, S. F. M., Abdulkareem-Alsultan, G., Othman, M. A. R., & Kawi, S. (2025). Adsorption isotherms and kinetic studies of nitrogen-doped porous carbon by sodium amide activation from natural rubber for CO<sub>2</sub> capture. *Materials Chemistry and Physics*, 343, 131058. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131058>

Periyannan, K., Selvaraj, H., Subbu, B., Pallikondaperumal, M., Karuppiyah, P., Rajabathar, J. R., Al-Lohedan, H., & Thangarasu, S. (2023). Green fabrication of chitosan from marine crustaceans and mushroom waste: Toward sustainable resource utilization. *Green Processing and Synthesis*, 12(1). <https://doi.org/10.1515/gps-2023-0093>

- Sakthivel, S., Bin Sharfan, I. I., & Abdulhamid, M. A. (2024). Water-soluble chitosan polymer for enhanced oil recovery in the carbonate reservoir. *International Journal of Biological Macromolecules*, 281, 136528. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136528>
- Setiati, R., Siregar, S., Wahyuningrum, D., & Rinanti, A. (2021). Synthesis method of chitin become chitosan polymer from shrimp shells for enhanced oil recovery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 737(1), 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/737/1/012048>
- Tackie-Otoo, B. N., Ayoub Mohammed, M. A., Yekeen, N., & Negash, B. M. (2020). Alternative chemical agents for alkalis, surfactants and polymers for enhanced oil recovery: Research trend and prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187, 106828. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106828>
- Tran, H. N., Lima, E. C., Juang, R. S., Bollinger, J. C., & Chao, H. P. (2021). Thermodynamic parameters of liquid–phase adsorption process calculated from different equilibrium constants related to adsorption isotherms: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106674. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106674>
- Ulfah, B. M., Fathaddin, M. T., Setiati, R., Ratnaningsih, D. R., Suprayitno, A., Afifah, R. S., & Firdaus. (2024). Chitosan as a Biopolymer in the EOR Method: A Literature Study. *E3S Web of Conferences*, 500, 03020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450003020>
- Ulfah, B. M., Setiati, R., Fathaddin, M. F., Ratnaningsih, D. R., Swadesi, B., Suprayitno, A., & Firdaus. (2023). The Potential of Crab Chitosan Polymer as EOR Injection Fluid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1239(1), 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1239/1/012038>
- Xue, T., Zhou, L., Wang, F., Tian, Z., Li, N., Ye, T., Hao, R., Yang, L., Gu, R., Gan, H., Wu, Z., Zhu, X., Liu, S., Sun, Y., Dou, G., & Meng, Z. (2024). A novel method to quantify chitosan in aqueous solutions by ultrahigh-performance liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Carbohydrate Polymers*, 329, 121758. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121758>
- Yang, S., Ma, T., He, Y., & Su, X. (2021). The molecular explanation for polyacrylamide viscosity

reduction in high-salinity formation-water. *AIP Advances*, 11(3).  
<https://doi.org/10.1063/5.0038243>

Yue, Y., Adhab, A. H., Sur, D., Menon, S. V., Singh, A., Supriya, S., Mishra, S. B., Nathiya, D., Mahdi, M. S., Mansoor, A. S., Radi, U. K., Abd, N. S., Alam, M. M., & Herati, K. (2025). Thermodynamic modeling adsorption behavior of a well-known gelation crosslinker on sandstone rocks. *Scientific Reports*, 15(1), 22544. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06005-w>