

EFEKTIVITAS BIOSURFAKTAN PKO DALAM CHEMICAL EOR: STUDI IFT, CMC, ADSORPSI, DAN TOKSISITAS

Abdurrahman Daulay, Novia Rita, Fuja Aprida

Universitas Islam Riau, Universitas Islam Riau, Universitas Islam Riau
Jl. Kaharuddin Nst No.113.Simpang Tiga, Kec. Bukit Raya, Kota Pekanbaru, Riau, Indonesia,
abdurrahmandaulay@student.uir.ac.id, noviarita@eng.uir.ac.id, aprida@student.uir.ac.id

ABSTRAK

Palm Kernel Oil (PKO) merupakan bahan baku potensial untuk produksi biosurfaktan karena kandungan medium *chain fatty acids* yang tinggi terutama asam laurat. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis biosurfaktan *metil ester sulfonate* (MES) dari PKO dan mengevaluasi performanya dalam menurunkan tegangan antarmuka serta meningkatkan perolehan minyak (*oil recovery*). Sintesis dilakukan melalui reaksi transesterifikasi menggunakan katalis H_2SO_4 , diikuti sulfonasi. Karakterisasi dilakukan melalui pengukuran sifat fisik (pH, densitas, viskositas), komposisi asam lemak (GC-MS), serta analisis FTIR. Uji performa meliputi *interfacial tension* (IFT), *critical micelle concentration* (CMC), adsorpsi pada medium berpori, uji toksisitas dan *oil recovery test* pada kondisi simulasi reservoir ($T = 50\text{ }^{\circ}C$ dengan salinitas 10.000 ppm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa biosurfaktan dari PKO mampu menurunkan IFT dari 15,2 mN/m (50 ppm) menjadi 1,2 mN/m (1000 ppm), dengan CMC tercapai pada konsentrasi 500 ppm. Adsorpsi biosurfaktan berada pada kisaran 28-32%, sementara uji toksisitas menunjukkan mortalitas meningkat hingga 85% pada 1000 ppm. Uji flooding menunjukkan *oil recovery* meningkat hingga 24,3% pada 1000 ppm. Dengan demikian, biosurfaktan dari PKO memiliki potensi sebagai agen EOR (*Enhanced Oil Recovery*), meskipun perlu kajian lanjut terkait toksisitasnya.

Kata Kunci: *Palm kernel oil*, biosurfaktan, *metil ester sulfonate*, IFT, *oil recovery*.

ABSTRACT

Palm kernel oil (PKO) is a potential raw material for biosurfactant production due to its high content of medium-chain fatty acids, particularly lauric acid. This study aimed to synthesize methyl ester sulfonate (MES) biosurfactant from PKO and evaluate their performance in reducing interfacial tension and increasing oil recovery. Synthesis was carried out through a transesterification reaction using H_2SO_4 as a catalyst, followed by sulfonation. Characterization was carried out through measurement of physical properties (pH, density, viscosity), fatty acid composition (GC-MS), and FTIR analysis. Performance test included interfacial tension (IFT). Critical micelle concentration (CMC), adsorption on porous media, toxicity testing, and oil recovery test under simulated reservoir conditions ($T = 50\text{ }^{\circ}C$, salinity 10.000 ppm). The results showed that the biosurfactant from PKO was able to reduce the IFT from 15.2 m N/m (50 ppm) to 1.2 m N/m (1000 ppm), with the CMC achieved at a concentration of 500 ppm. Biosurfactant adsorption was in the range of 28-32%, while toxicity tests showed an increase in mortality of up to 85% at 1000 ppm. Flooding tests showed an increase in oil recovery of up to 24.3% at 1000 ppm. Thus, the biosurfactant from PKO has potential as an Enhanced Oil Recovery (EOR) agent, although further studies regarding its toxicity are needed.

Keyword: palm kernel oil, biosurfactant, methyl ester sulfonate, IFT, oil recovery.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat menuntut pemanfaatan peningkatan perolehan

minyak *Enhanced Oil recovery*. Salah satu metode EOR yang menjanjikan adalah penggunaan surfaktan untuk menurunkan tegangan antarmuka minyak dan air, sehingga

mobilitas minyak yang terperangkap dalam pori-pori batuan yang dapat ditingkatkan. Surfaktan sintesis umumnya efektif, namun memiliki kelemahan berupa biaya tinggi, ketahanan rendah terhadap kondisi reservoir, serta isu lingkungan.

Di industri minyak bumi masih menjadi salah satu tulang punggung penyedia energi dunia meskipun energi terbarukan terus berkembang. Seiring meningkatnya kebutuhan energi, tantangan yang dihadapi adalah menurunnya produksi dari lapangan minyak konvensional akibat berkurangnya tekanan reservoir dan terbatasnya efisiensi metode produksi primer maupun sekunder. Pada tahap primer, perolehan minyak hanya 10-20% dari total cadangan, sedangkan pada tahap sekunder dengan injeksi air atau gas, perolehan tambahan rata-rata hanya 20-30%. Dengan demikian, sekitar 50-70% cadangan minyak masih tertinggal di dalam reservoir dan tidak dapat diproduksi tanpa metode lanjutan. Hal ini mendorong penerapan *Enhanced Oil Recovery* (EOR) sebagai strategi penting untuk mengoptimalkan produksi migas (Widiyaningsih et al., 2025).

Menurut (Ekawati et al., 2022) menyatakan salah satu metode EOR yang menjanjikan adalah injeksi kimia (chemical EOR) menggunakan surfaktan. Surfaktan berperan menurunkan tegangan antarmuka (*interfacial tension*/IFT) antara minyak dan air, meningkatkan pembasahan batuan reservoir, serta memobilisasi minyak yang terperangkap dalam pori-pori batuan. Namun demikian, surfaktan sintesis yang umum digunakan masih menghadapi kendala berupa biaya produksi yang tinggi, ketergantungan terhadap bahan baku berbasis minyak bumi, serta isu lingkungan terkait biodegradabilitas dan toksisitas. Kondisi ini mendorong para peneliti untuk mencari alternatif surfaktan ramah lingkungan yang dapat diproduksi secara ekonomis dan berkelanjutan (Teknik & Lil, 2023).

Biosurfaktan menjadi salah satu kandidat yang menarik karena memiliki keunggulan berupa biodegradabilitas tinggi, toksisitas yang relatif rendah, serta kemampuan untuk diproduksi dari sumber daya yang terbarukan (Alfarishi, 2024). Di antara berbagai bahan baku potensial, minyak inti sawit (*palm kernel oil*/PKO) menempati posisi penting karena Indonesia merupakan salah satu produsen kelapa sawit terbesar di dunia. PKO kaya akan asam

lemak rantai sedang, terutama asam laurat (C12:0) dan asam miristat (C14:0) yang merupakan ideal dalam sintesis surfaktan anionik seperti *methyl ester sulfonate* (MES). MES dari PKO telah diteliti sebelumnya dalam aplikasi deterjen dan terbukti memiliki kinerja baik dalam menurunkan tegangan permukaan. Namun, aplikasinya untuk kebutuhan EOR masih relatif terbatas (Oil, 2024).

Beberapa penelitian terdahulu melaporkan bahwa biosurfaktan dari PKO mampu menurunkan tegangan antarmuka hingga mendekati nilai ultra-low IFT ($<10^{-3}$ mN/m) pada kondisi laboratorium (Darmawan & Abdallah, 2022). Meski demikian, masih terdapat sejumlah kendala dalam aplikasinya antara lain kestabilan terhadap kondisi reservoir (salinitas tinggi, temperatur tinggi) interaksi dengan mineral batuan yang menyebabkan adsorpsi, serta potensi efek toksik terhadap organisme akuatik (Soeherman et al., 2025). Dengan demikian, terdapat beberapa penelitian yang perlu dijawab: sejauh mana biosurfaktan berbasis PKO dapat berfungsi secara efektif dalam aplikasi EOR dengan memperhatikan aspek kinerja teknis dan kelayakan (Paramitha et al., 2022).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk:

1. Mensintesis biosurfaktan berbasis PKO melalui proses *esterifikasi-transesterifikasi*.
2. Melakukan karakterisasi fisikokimia biosurfaktan menggunakan parameter pH, *yield*, warna dan analisis FTIR.
3. Mengevaluasi efektivitas biosurfaktan melalui pengujian IFT dan penentuan nilai *Critical Micelle Concentration* (CMC).
4. Menilai interaksi biosurfaktan dengan media reservoir melalui uji adsorpsi.
5. Mengkaji aspek toksisitas biosurfaktan terhadap organisme uji untuk menilai kelayakan lingkungannya.

Dengan pencapaian tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi EOR berbasis biosurfaktan dari sumber daya lokal yang terbarukan, ekonomis dan ramah lingkungan. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk penelitian lanjutan menuju tahap skala lapangan (*field pilot test*), serta mendukung program kemandirian energi nasional melalui pemanfaatan produk turunan kelapa sawit untuk industri migas.

II. METODE PENELITIAN

A. Bahan

- Bahan utama: *Palm Kernel Oil* (PKO).
- Bahan kimia: Metanol, H₂SO₄ pekat (katalis), NaOH, NaCl untuk simulasi salinitas).
- Peralatan: GC-MS, FTIR, Viskometer, densitometer, kolom sand-pack.

B. Sintesis Biosurfaktan

PKO direaksikan dengan methanol menggunakan katalis H₂SO₄ (80%) dengan rasio molar 1:6 pada suhu 55 °C selama 2 jam. Produk *metil ester* kemudian disulfonasi untuk menghasilkan *metil ester sulfonate* (MES). Dikarenakan mengatasi tantangan spesifik yang menyebabkan kegagalan sebelumnya dengan pendekatan yang lebih terfokus pada kondisi local, optimalisasi formulasi, dan pemanfaatan teknologi riset terbaru dengan tujuan akhir mencapai hasil EOR yang lebih baik dan ekonomis (Anwar, 2015).

C. Karakterisasi Awal

Produk dianalisis terhadap nilai pH, densitas, viskositas dan warna. Komposisi asam lemak PKO ditentukan dengan GC-MS. Analisis FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi MES.

D. Uji Efektivitas

Ada beberapa uji efektivitas yang dilakukan dalam penelitian yang dilakukan adalah:

- *Interfacial Tension* (IFT): diuji pada konsentrasi 50-1000 ppm.
- *Critical Micelle Concentration* (CMC): ditentukan dari grafik IFT vs konsentrasi.
- *Adsorpsi*: pengukuran selisih konsentrasi awal dan sisa dalam media berpori.
- Toksisitas: diuji pada konsentrasi 50-1000 ppm terhadap organisme uji.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi Awal Palm Kernel Oil (PKO)

Palm Kernel Oil (PKO) yang digunakan memiliki pH 5,2 dengan warna kuning pucat. Densitas 0,918 g/mL dan viskositas 32,5 cP. Di lakukan untuk mengetahui komposisi asam lemak dalam PKO sebagai bahan dasar biosurfaktan (Bangun et al., 2023). Hasil analisis menunjukkan bahwa PKO didominasi oleh asam laurat (47,5%), miristat (16,8%) dan oleat (15,2). Kandungan ini sesuai dengan karakteristik PKO sebagai minyak nabati kaya medium *chain fatty acids* yang berpotensi sebagai bahan baku surfaktan (Setianto et al., 2013).

Tabel 1. Komposisi Asam Lemak PKO

Komponen Asam Lemak	Persentase (%)
Asam Laurat (C12:0)	47.5
Asam Miristat (C14:0)	16.8
Asam Kaprat (C10:0)	5.5
Asam Kaprilat (C8:0)	3.1
Asam Palmitat (C16:0)	8.9
Asam Oleat (C18:1)	15.2
Lainnya	3.0

Dari tabel diatas menjelaskan nilai terhadap PKO memiliki dominasi asam laurat >40%, sehingga sangat potensial sebagai bahan baku surfaktan karena rantai C12 dapat memberikan kestabilan pada media berair (Setianto et al., 2013).

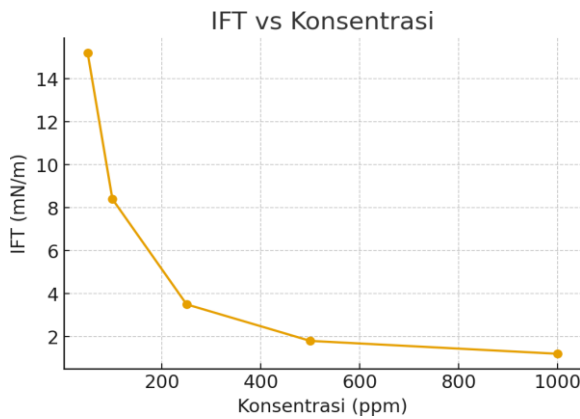
B. Sintesis Biosurfaktan

Reaksi transesterifikasi PKO dengan methanol pada suhu 55 °C selama 2 jam dengan katalis H₂SO₄ menghasilkan *yield* 78%. Produk biosurfaktan memiliki pH 6,8 dengan warna putih kekuningan. Analisis FTIR menunjukkan puncak khas gugus *ester* (C=O, 1735 cm⁻¹), ikatan C-H alifatik (2920 cm⁻¹) dan gugus sulfonasi (S=O, 1220 cm⁻¹) yang menandakan terbentuknya *metil ester sulfonate* (MES).

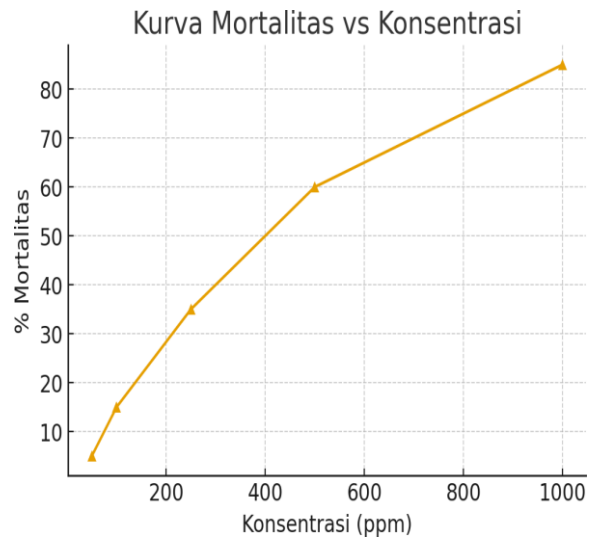
C. *Interfacial Tension* (IFT) dan CMC

Uji IFT menunjukkan penurunan drastis dari 15,2 mN/m pada 50 ppm menjadi 1,8 mN/m pada 500 ppm, dan mencapai minimum 1,2 mN/m pada 1000 ppm. Penentuan *Critical Micelle Concentration* (CMC) berada pada sekitar 500

ppm, ditandai dengan perubahan penurunan IFT yang tidak signifikan setelah konsentrasi tersebut.



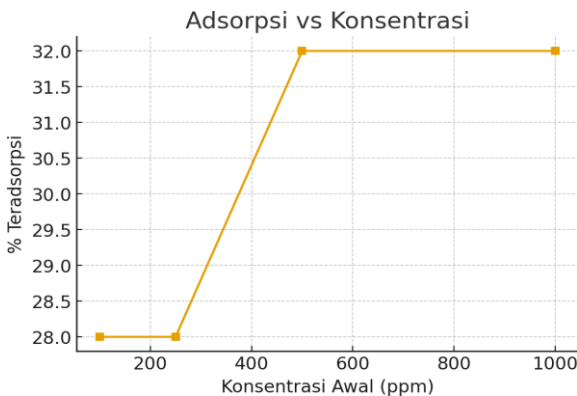
Gambar 1. IFT terhadap konsentrasi



Gambar 3. Kurva Mortalitas Biosurfaktan

D. Adsorpsi Pada Media Padat

Uji adsorpsi menunjukkan bahwa sekitar 28-32% biosurfaktan teradsorpsi pada konsentrasi 100-1000 ppm. Tingkat adsorpsi yang relatif stabil menunjukkan biosurfaktan memiliki potensi yang cukup baik dalam menjaga ketersediaan surfaktan di medium berpori.



Gambar 2. Adsorpsi vs konsentrasi

E. Uji Toksisitas

Uji toksisitas menunjukkan mortalitas meningkat dengan konsentrasi. Pada 50 ppm mortalitas hanya 5%, sedangkan pada 1000 ppm mortalitas mencapai 85%. Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun efektif, penggunaan surfaktan dalam aplikasi lingkungan harus memperhatikan batas aman.

F. Oil Recovery Test

Hasil uji flooding dengan kondisi simulasi reservoir (salinitas 10.000 ppm, T = 24,3 °C) menunjukkan peningkatan *oil recovery* seiring peningkatan konsentrasi. Pada 250 ppm *recovery* 12,5%, 500 ppm *recovery* 18,7% dan 1000 ppm *recovery* mencapai 24,3%. Hal ini menegaskan efektivitas biosurfaktan MES dalam meningkatkan perolehan minyak pada kondisi reservoir simulasi.

Tabel 2. Hasil Oil Recovery Test

Konsentrasi (ppm)	Oil Recovery (%)
250	12,5
500	18,7
1000	24,3

G. Pembahasan

Secara menyeluruh, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa biosurfaktan yang disintesis dari *palm kernel oil* (PKO) memiliki potensi yang signifikan untuk diaplikasikan pada proses *Enhanced Oil Recovery* (EOR). Analisis ini mencakup sifat fisik-kimia dari PKO, hasil sintesis biosurfaktan, uji karakterisasi, hingga performa dalam menurunkan tegangan antar muka (IFT), adsorpsi, toksisitas, serta kemampuan meningkatkan perolehan minyak (*oil recovery*).

Karakterisasi awal PKO memiliki pH 5,2 sedangkan densitas 0,918 g/mL dan viskositas 32,5 cP. Komposisi asam lemak didominasi oleh asam laurat (47,5) dan asam miristat (16,8%),

sedangkan kandungan asam lemak berantai sedang (C8-C14) diketahui sangat penting sebagai biosurfaktan karena mampu menghasilkan molekul dengan sifat tensioaktif tinggi.

Sintesis dan karakterisasi biosurfaktan di reaksi dengan katalis H_2SO_4 yang menghasilkan *yield* sebesar 78% dengan karakteristik biosurfaktan berwarna putih kekuningan dan pH mendekati netral (6,8). Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus ester (1735 cm^{-1}), gugus S=O (1220 cm^{-1}), serta C-H alifatik (2920 cm^{-1}), menandakan terbentuknya *metil ester sulfonate* (MES) yang merupakan turunan biosurfaktan anionik.

Pengujian IFT menunjukkan tren penurunan yang signifikan seiring peningkatan konsentrasi biosurfaktan. Dari konsentrasi 50 ppm (15,2 mN/m) hingga 500 ppm (1,8 mN/m), terjadi penurunan tajam, dan stabil pada 1000 ppm (1,2 mN/m). Titik kritis terjadi pada 500 ppm yang dapat diidentifikasi sebagai *Critical Micelle Concentration* (CMC), Dimana setelah titik penurunan IFT relatif kecil nilai IFT minimum 1,2 mN/m sudah mendekati syarat surfaktan untuk EOR ($\leq 10^{-3}$ mN/m) dan menunjukkan efektivitas biosurfaktan PKO dalam mengurangi tegangan antar muka minyak dan air.

Adsorpsi pada media padat mempunyai data adsorpsi memperlihatkan bahwa sekitar 28-32% biosurfaktan teradsorpsi pada media padat (pasir) pada berbagai konsentrasi. Fenomena ini wajar terjadi pada biosurfaktan karena adanya elektrostatis dan hidrofobik dengan permukaan mineral. Karena konsentrasi efektif dalam fase cair tetap mencukupi untuk menurunkan IFT. Namun demikian, adsorpsi ini perlu menjadi perhatian pada aplikasi lapangan karena dapat meningkatkan kebutuhan surfaktan (Hsu et al., 2025).

Pengujian toksisitas memperlihatkan peningkatan mortalitas organisme uji seiring dengan konsentrasi surfaktan. Pada 50 ppm mortalitas hanya 5%, namun meningkat tajam menjadi 60% pada 500 ppm, dan mencapai 85% pada 1000 ppm. Hal ini menandakan bahwa meskipun biosurfaktan efektif pada konsentrasi tinggi, aspek lingkungan harus mempertimbangkan, khususnya dalam penerapan skala lapangan.

Uji flooding atau *oil recovery test* menggunakan sand-pack column pada kondisi simulasi reservoir (salinitas 10.000 ppm NaCl, $T = 50\text{ }^\circ\text{C}$) menunjukkan bahwa biosurfaktan

dapat meningkatkan peroleh minyak sebesar 12,5% pada 250 ppm, 18,7 pada 500 ppm, dan mencapai 24,3% pada 1000 ppm. Peningkatan *oil recovery* yang sejalan dengan konsentrasi menegaskan peran biosurfaktan dalam memobilisasi minyak terperangkap melalui mekanisme penurunan IFT dan peningkatan nilai pembasahan batuan reservoir.

Dibandingkan surfaktan sintesis yang digunakan dalam EOR, biosurfaktan dari PKO memiliki keunggulan pada aspek keberlanjutan dan ketersediaan bahan baku. Nilai IFT yang mencapai 1,2 mN/m cukup kompetitif dan mendekati performa surfaktan industri. Namun, tingkat toksisitas dan adsorpsi masih menjadi tantangan yang harus diperhatikan dalam pengembangan lebih lanjut. Optimasi formulasi, misalnya melalui penambahan surfaktan atau polimer dapat menjadi strategi untuk menurunkan dosis efektif sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Kadarwati, n.d.).

Dari hasil penelitian (Kadarwati, n.d.) bahwa biosurfaktan *methyl ester sulfonate* (MES) berbasis minyak nabati memiliki stabilitas tinggi pada kondisi temperature dan salinitas ekstrem, sehingga berpotensi diaplikasikan dalam system EOR dengan efisiensi tinggi dan dampak lingkungan yang minimal. Berdasarkan hasil penelitian oleh (Eni et al., 2017), beberapa isolat dari reservoir minyak bumi diketahui mampu menghasilkan biosurfaktan dengan kemampuan menurunkan tegangan antar muka minyak-air secara signifikan.

Secara umum, hasil penelitian ini membuktikan bahwa biosurfaktan dari PKO berpotensi besar untuk diaplikasikan dalam teknologi EOR. Karakteristik kimia, kemampuan menurunkan IFT, kestabilan pada kondisi reservoir, serta kinerja dalam meningkatkan *oil recovery* merupakan faktor pendukung utama. Meski demikian, isu toksisitas pada konsentrasi tinggi serta adsorpsi pada media padat harus menjadi perhatian dalam tahap *scale-up*. Dengan pengembangan lebih lanjut, biosurfaktan berbasis PKO berpotensi menjadi alternatif ramah lingkungan bagi surfaktan sintetis dalam aplikasi industri migas.

IV. KESIMPULAN

Biosurfaktan *metil ester sulfonate* (MES) berbasis PKO berhasil disintesis dengan *yield* 78% dan menunjukkan karakteristik surfaktan yang baik. Produk mampu menurunkan tegangan

antarmuka hingga 1,2 mN/m pada konsentrasi 1000 ppm dengan CMC sekitar 500 ppm. Adsorpsi biosurfaktan berkisar 28-32% dan *oil recovery* meningkat signifikan hingga 24,3% pada 1000 ppm. Hasil ini menegaskan potensi MES dari PKO sebagai agen surfaktan untuk aplikasi EOR, meskipun perlu kajian lebih lanjut terkait aspek toksisitas pada konsentrasi tinggi.

V. DAFTAR ISTILAH

- Adsorpsi = Proses penyerapan molekul surfaktan ke permukaan padatan dalam media berpori.
- CMC = *Critical Micelle Concentration*, konsentrasi minimum biosurfaktan yang membentuk misel.
- EOR = *Enhanced Oil Recovery*, metode peningkatan perolehan minyak tahap lanjut.
- PKO = *Palm Kernel Oil*, minyak inti sawit sebagai bahan baku biosurfaktan.
- IFT = *Interfacial Tension*, tegangan antar muka antara dua fluida tidak saling bercampur.
- IFT Reduction = Penurunan tegangan antar muka akibat aktivitas surfaktan.
- MES = *Methyl Ester Sulfonate*, jenis surfaktan anionic hasil sulfonasi metil ester.
- Toksitas = Tingkat efek racun terhadap organisme hidup akibat paparan bahan kimia.
- Sand-Pack Column* = perangkat laboratorium berisi pasir untuk simulasi mediarreservoir dalam uji *oil recovery*.
- Salinitas = Kandungan garam terlarut dalam air yang memengaruhi kestabilan biosurfaktan.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Prodi Teknik Perminyakan Universitas Islam Riau dan Kepada Laboratorium Teknik Kimia Universitas Riau yang sudah memberikan kontribusi kepada peneliti dalam melakukan pengujian dan penelitian.

REFERENSI

- Alfarishi, M. (2024). *Analisis Kualitas Palm Kernel Oil pada PT. Ujong Neubok Dalam Menggunakan Metode Statistical Quality Control*. 10(2), 190–197.
- Anwar, C. (2015). *Dan Minyak Solar Sebagai Pengganti Minyak Solar terhadap Kinerja Mesin (The Effect Of Mixing Palm Oil And Diesel Oil As Diesel Substitutes Against Engine Performances)*. 49(2), 4–5.
- Bangun, R., Alat, K., & Kernel, P. (2023). *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering Design and Performance Test of Kernel Separator from Oil Palm Shell*.
- Darmawan, A. A., & Abdallah, B. N. (2022). *Jurnal Optimasi Teknik Industri Prioritas Penyelesaian Akar Masalah Kualitas Palm Kernel Oil Dengan Memperhatikan Uncertain Information*. 51–58.
- Ekawati, R., Fattah, D. A., Paramitha, A., Abdillah, I., & Wijayanti, P. (2022). *Karakteristik kimia milkswit dan kimbrownsuit : “ inovasi produk olahan berbahan baku palm kernel oil .”* 16(1), 113–122.
<https://doi.org/10.21107/agrointek.v16i1.12111>
- Eni, H., Sutriah, K., & Muljani, S. (2017). *Aplikasi EOR Pada Lapangan Minyak Intermediet (Surfactant based on Palm Oil for EOR Application at Intermediate Oil Field)*. 51(1), 2–7.
- Hsu, C., Mahmoud, Z. H., Hussein, U. A., Abduvalieva, D., Alsultany, F. H., & Kianfar, E. (2025). *South African Journal of Chemical Engineering Biosurfactants : Properties , applications and emerging trends*. *South African Journal of Chemical Engineering*, 53(April), 21–39.
<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.04.002>
- Kadarwati, S. (n.d.). *Karakterisasi Biosurfaktan yang Dihasilkan Bakteri Providencia rettgeri dan Bacillus subtilis dari Reservoir Minyak di Indonesia*. 18–26.
- Oil, P. K. (2024). *(Journal of Industrial and Manufacture Engineering)*. 8(November).
- Paramitha, A., Ekawati, R., D-iv, S. P. P., Studi, P., & Tanaman, B. (2022). *Analisis Karakteristik Mutu Palm Kernel Oil (PKO) Asal PT . PERKEBUNAN NUSANTARA IV UNIT USAHA PABATU*. 20(1), 50–62.

- Setianto, W. B., Atmaji, P., Anggoro, D. D., Dengan, E., Dioksida, K., & Sehubungan, S. (2013). *Palm Kernel Oil Solubility Examination And Its Modeling In Extraction Process Using Supercritical Carbon Dioxide Palm Kernel Oil Solubility Examination ...* 14(3), 242–246.
- Soeherman, G. P., Putri, P. G., Agassi, T. N., Indrawan, I., Studi, P., Produk, P., Pertanian, J. T., & Lampung, P. N. (2025). *Upcycling Cangkang Kelapa Sawit Menjadi Green Filler Teraktivasi Ultrasonik dan Aplikasinya Sebagai Pengisi Kompon Karet*. 19(1), 25–32. <https://doi.org/10.24198/jt.vol19n1.4>
- Teknik, M., & Lil, P. T. (2023). *Optimasi Produksi Crude Palm Oil (CPO) Dan Inti Sawit (Kernel)*. 15(1), 0–4.
- Widiyaningsih, I., Sulistyarso, H. B., Kurnia, I., & Marhaendrajana, T. (2025). *Investigation and Optimization of Enhanced Oil Recovery Mechanism By Sophorolipid Biosurfactant in Carbonate Reservoir*. 48(3), 23–36.

↑ If possible, equalize columns on the last page ↑