



Pengaruh Variasi pH HCL dalam Pengasaman Montmorillonit Terhadap Hasil Bleaching Crude Palm Oil

Tiara Fatika Sari^{1*}, Riri Jonuarti²

¹⁻² Universitas Negeri Padang, Indonesia

email: tiarafatikasari305@gmail.com¹

Article Info :

Received:
22-03-2026
Revised:
04-04-2026
Accepted:
16-04-2026

Abstract

Crude Palm Oil (CPO) requires a bleaching process to reduce pigments and free fatty acids (FFA). Montmorillonite as an adsorbent needs acid activation to improve its adsorption capacity. This study aimed to investigate the effect of HCl activation at pH 2, 4, and 6 on the surface morphology of montmorillonite as characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and its influence on CPO bleaching efficiency. Acid activation was performed using 0.01 M HCl with a slurry titration method. Particle size analysis was conducted using ImageJ software with the length parameter. Results showed that unactivated montmorillonite had a mean particle length of 1054.54 nm with dense and agglomerated morphology. Activation at pH 4 produced the most homogeneous particle distribution with a mean length of 1635.57 nm and a more open surface structure. Bleaching analysis demonstrated that montmorillonite activated at pH 4 generated the lowest FFA content of 1.4% compared to pH 2 and pH 6. These findings indicate that pH 4 activation provides the optimum balance between structural stability, pore opening, and adsorption effectiveness for CPO bleaching.

Keywords: Montmorillonite, Acid Activation, SEM, Particle Size, Crude Palm Oil Bleaching.

Abstrak

Minyak Sawit Mentah (MSM) memerlukan proses pemutihan untuk mengurangi pigmen dan asam lemak bebas (ALB). Montmorillonit sebagai adsorben memerlukan aktivasi asam untuk meningkatkan kapasitas adsorpsinya. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh aktivasi HCl pada pH 2, 4, dan 6 terhadap morfologi permukaan montmorillonit yang dikarakterisasi dengan Mikroskop Elektron Pemindai (SEM) serta pengaruhnya terhadap efisiensi pemutihan MSM. Aktivasi asam dilakukan menggunakan HCl 0,01 M dengan metode titrasi slurry. Analisis ukuran partikel dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ dengan parameter panjang. Hasil menunjukkan bahwa montmorillonit yang tidak diaktifkan memiliki panjang partikel rata-rata 1054,54 nm dengan morfologi yang padat dan menggumpal. Aktivasi pada pH 4 menghasilkan distribusi partikel yang paling homogen dengan panjang rata-rata 1635,57 nm dan struktur permukaan yang lebih terbuka. Analisis pemutihan menunjukkan bahwa montmorillonit yang diaktifkan pada pH 4 menghasilkan kandungan asam lemak bebas (FFA) terendah sebesar 1,4% dibandingkan dengan pH 2 dan pH 6. Temuan ini menunjukkan bahwa aktivasi pada pH 4 memberikan keseimbangan optimal antara stabilitas struktural, pembukaan pori, dan efektivitas adsorpsi untuk pemutihan CPO.

Kata Kunci: Montmorillonit, Aktivasi Asam, SEM, Ukuran Partikel, Pemutihan Minyak Sawit Mentah.



©2022 Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Crude Palm Oil (CPO) menempati posisi strategis dalam rantai pasok pangan, oleokimia, dan energi global karena karakteristiknya sebagai minyak nabati dengan produktivitas tertinggi dibandingkan komoditas minyak lainnya, namun peningkatan konsumsi global juga disertai tuntutan mutu yang semakin ketat terhadap stabilitas oksidatif, warna, kandungan pengotor, dan kadar asam lemak bebas yang menentukan kualitas produk hilir serta keberterimaan industri internasional. Dinamika tersebut mendorong perkembangan teknologi refining yang semakin berorientasi pada efisiensi adsorpsi, pengurangan kehilangan minyak, dan optimasi karakteristik adsorben berbasis mineral lempung yang mampu meningkatkan kualitas pemurnian secara simultan tanpa meningkatkan biaya produksi secara signifikan. Dalam konteks tersebut, montmorillonit memperoleh perhatian luas karena struktur lapisan silikatnya memiliki kapasitas tukar kation tinggi, luas permukaan besar, dan karakter kimia permukaan yang dapat dimodifikasi melalui perlakuan asam untuk meningkatkan afinitas adsorptif terhadap pigmen, fosfolipid, logam, dan senyawa polar dalam CPO (Shahidi, 2005;

Yariv & Cross, 2001). Kompleksitas karakteristik CPO yang kaya pigmen karotenoid dan rentan mengalami pembentukan Free Fatty Acid (FFA) selama proses pengolahan juga mempertegas pentingnya pengembangan adsorben dengan morfologi permukaan yang stabil dan aktif secara kimiawi, mengingat peningkatan FFA berkorelasi langsung dengan degradasi mutu minyak dan penurunan stabilitas penyimpanan produk akhir (Rosli et al., 2023; Tan et al., 2023).

Literatur terdahulu menunjukkan bahwa efektivitas bleaching earth sangat dipengaruhi oleh transformasi struktur permukaan adsorben setelah aktivasi asam, terutama melalui mekanisme dealuminasi parsial, pembukaan pori, dan peningkatan jumlah situs aktif yang mengontrol interaksi adsorpsi antara permukaan mineral dan komponen pengotor minyak. Perspektif kimia permukaan menjelaskan bahwa perubahan energi permukaan akibat protonasi mineral lempung dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui modifikasi distribusi muatan dan peningkatan luas kontak efektif adsorben terhadap molekul polar dalam sistem minyak (Somorjai & Li, 2010). Penelitian mengenai pemanfaatan bentonit teraktivasi pada proses pemurnian minyak sawit memperlihatkan bahwa peningkatan aktivitas adsorptif sering kali berhubungan dengan perubahan morfologi mikro yang menghasilkan struktur lebih terbuka dan heterogen, meskipun respons tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi aktivasi yang digunakan. Kajian mengenai reactivated spent bleaching earth juga menunjukkan bahwa efisiensi penurunan pengotor minyak dapat dipertahankan ketika struktur aktif adsorben berhasil diregenerasi melalui pengasaman terkontrol, yang menandakan bahwa parameter kimia selama aktivasi memiliki peran sentral dalam menentukan performa bleaching (Sinaga et al., 2025). Pada saat yang sama, pemanfaatan bentonit termodifikasi dalam proses konversi CPO menuju green diesel memperlihatkan bahwa aktivasi mineral lempung tidak hanya relevan dalam refining minyak pangan, tetapi juga berpengaruh terhadap performa katalitik dan stabilitas struktur pada aplikasi energi berkelanjutan, sehingga memperluas relevansi ilmiah studi mengenai modifikasi montmorillonit (Zikri et al., 2025).

Meskipun berbagai penelitian telah mengonfirmasi bahwa aktivasi asam mampu meningkatkan kualitas adsorben berbasis montmorillonit, lanskap literatur masih menunjukkan inkonsistensi mendasar terkait hubungan antara intensitas pengasaman, perubahan morfologi partikel, dan efektivitas bleaching pada matriks CPO yang kompleks. Sebagian penelitian menitikberatkan evaluasi pada kapasitas adsorpsi atau penurunan warna tanpa mengaitkannya secara sistematis dengan transformasi struktur mikro permukaan, sementara penelitian lain lebih berfokus pada karakterisasi mineralogi tanpa mengevaluasi konsekuensi langsungnya terhadap performa bleaching aktual. Kondisi tersebut menghasilkan keterputusan analitis antara perubahan fisik adsorben dan respons kimia minyak hasil pemurnian, padahal interaksi keduanya merupakan inti mekanisme bleaching berbasis adsorpsi. Di sisi lain, variasi parameter aktivasi yang digunakan dalam berbagai studi sering kali dinyatakan dalam konsentrasi asam atau waktu perlakuan tanpa pendekatan berbasis kontrol pH yang lebih representatif terhadap tingkat keasaman efektif sistem slurry, sehingga interpretasi mengenai kondisi optimum aktivasi menjadi sulit dibandingkan secara empiris. Ketidakeragaman metodologis tersebut menyebabkan hubungan antara tingkat keasaman HCl, distribusi ukuran partikel, aglomerasi permukaan, dan penurunan FFA belum memiliki model interpretatif yang benar-benar konsisten dalam literatur internasional.

Persoalan tersebut memiliki implikasi ilmiah dan praktis yang signifikan karena industri pemurnian minyak sawit menghadapi tekanan simultan untuk meningkatkan kualitas produk sekaligus menekan konsumsi adsorben dan meminimalkan limbah bleaching earth. Ketidaktepatan kondisi aktivasi asam berpotensi menghasilkan degradasi struktur montmorillonit yang justru menurunkan stabilitas pori, meningkatkan aglomerasi partikel, dan mengurangi efisiensi adsorpsi meskipun tingkat keasaman sistem semakin tinggi. Situasi ini memperlihatkan bahwa peningkatan kekuatan asam tidak selalu linear dengan peningkatan performa bleaching, sehingga pemahaman yang lebih presisi mengenai pengaruh variasi pH terhadap morfologi mikro menjadi penting dalam pengembangan adsorben yang lebih selektif dan efisien. Tantangan tersebut semakin relevan ketika kualitas awal CPO sangat dipengaruhi oleh pembentukan FFA selama proses pengolahan dan penyimpanan, yang berdampak langsung terhadap stabilitas oksidatif dan mutu komersial minyak sawit (Tan et al., 2023). Dalam perspektif industri modern, optimasi adsorben berbasis montmorillonit juga berkaitan dengan upaya menciptakan proses refining yang lebih berkelanjutan karena efektivitas adsorpsi yang tinggi dapat menekan kebutuhan energi, mengurangi penggunaan bahan kimia tambahan, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya mineral alam (Shahidi, 2005).

Penelitian ini menempatkan diri pada irisan antara kajian kimia permukaan, rekayasa material mineral, dan teknologi pemurnian minyak nabati dengan menyoroti hubungan kausal antara variasi pH HCl dalam aktivasi montmorillonit, perubahan morfologi mikro adsorben, dan efektivitas bleaching CPO berdasarkan indikator penurunan FFA. Berbeda dari pendekatan terdahulu yang umumnya memisahkan karakterisasi morfologi dan evaluasi performa bleaching, penelitian ini mengintegrasikan analisis Scanning Electron Microscope (SEM), pengukuran distribusi ukuran partikel berbasis ImageJ, dan pengujian efektivitas bleaching dalam satu kerangka eksperimental yang memungkinkan interpretasi lebih komprehensif terhadap mekanisme adsorpsi. Pendekatan berbasis kontrol pH pada proses slurry titration juga memberikan perspektif metodologis yang lebih terukur mengenai intensitas aktivasi asam dibandingkan pendekatan konvensional berbasis konsentrasi larutan semata, karena perubahan pH secara langsung merepresentasikan kondisi kimia aktual selama interaksi antara HCl dan montmorillonit berlangsung. Fokus pada pH 2, 4, dan 6 diposisikan sebagai upaya untuk mengevaluasi batas transisi antara aktivasi optimal dan degradasi struktural adsorben yang dapat memengaruhi homogenitas distribusi partikel serta keterbukaan permukaan aktif.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi pH HCl terhadap perubahan morfologi permukaan montmorillonit serta hubungannya dengan efektivitas bleaching Crude Palm Oil berdasarkan penurunan kadar Free Fatty Acid. Kontribusi teoretis penelitian terletak pada pengembangan pemahaman mengenai keterkaitan antara intensitas pengasaman, transformasi struktur mikro adsorben, dan respons adsorpsi pada sistem minyak sawit mentah, sementara kontribusi metodologis diwujudkan melalui integrasi karakterisasi SEM, analisis distribusi ukuran partikel berbasis citra digital, dan evaluasi kuantitatif performa bleaching dalam satu desain eksperimen terstruktur. Temuan penelitian diharapkan dapat memperkuat basis ilmiah pengembangan adsorben montmorillonit teraktivasi yang lebih efisien, stabil, dan aplikatif bagi proses refining minyak sawit berorientasi kualitas dan keberlanjutan industri.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi empiris berbasis eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif yang dirancang untuk mengevaluasi pengaruh variasi pH HCl terhadap transformasi morfologi montmorillonit dan efektivitas bleaching Crude Palm Oil (CPO). Tahapan eksperimen dimulai dengan preparasi bentonit komersial yang mengandung montmorillonit sebagai komponen utama melalui proses penggerusan dan pengayakan hingga ukuran partikel $<74 \mu\text{m}$ untuk memperoleh homogenitas awal material. Aktivasi asam dilakukan menggunakan metode slurry titration dengan rasio montmorillonit dan aquades 1:10 (b/v), kemudian larutan HCl 0,01 M ditambahkan secara bertahap hingga mencapai variasi pH 2, 4, dan 6 sambil diaduk menggunakan magnetic stirrer selama dua jam pada suhu ruang. Proses ini dirancang untuk mengontrol intensitas dealuminasi parsial, pembukaan pori, dan pembentukan situs aktif pada permukaan mineral lempung sesuai prinsip modifikasi kimia permukaan montmorillonit yang dijelaskan dalam studi mineralogi lempung modern (Bergaya et al., 2006). Sampel hasil aktivasi dicuci hingga filtrat mendekati netral dan dikeringkan pada suhu 105°C sebelum dilakukan karakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Analisis ukuran partikel dilakukan melalui software ImageJ menggunakan parameter length untuk menyesuaikan bentuk partikel montmorillonit yang tidak sferis, sedangkan distribusi data diolah menggunakan Origin untuk memperoleh nilai mean length dan pola homogenitas partikel. Tahap bleaching dilakukan dengan mencampurkan montmorillonit teraktivasi ke dalam CPO pada suhu $60\text{--}70^\circ\text{C}$ selama 30 menit untuk mengevaluasi pengaruh perubahan struktur adsorben terhadap kemampuan penurunan kadar Free Fatty Acid (FFA).

Validasi metodologis penelitian dilakukan melalui integrasi karakterisasi morfologi mikro dan pengujian performa adsorptif dalam satu desain eksperimental yang memungkinkan evaluasi hubungan kausal antara kondisi aktivasi asam dan efektivitas bleaching. Ketahanan metodologis penelitian diperkuat melalui penggunaan parameter pH sebagai variabel kontrol utama selama proses slurry titration sehingga kondisi kimia aktivasi dapat direpresentasikan secara lebih presisi dibandingkan pendekatan berbasis konsentrasi larutan semata. Evaluasi morfologi dilakukan berdasarkan interpretasi citra SEM yang mencakup tingkat aglomerasi, keterbukaan permukaan, dan distribusi ukuran partikel, sedangkan efektivitas bleaching diukur menggunakan analisis titrasi asam-basa terhadap kadar FFA sebelum dan sesudah perlakuan adsorben. Persentase penurunan FFA digunakan sebagai indikator kuantitatif utama untuk menilai performa adsorpsi montmorillonit teraktivasi pada masing-masing

variasi pH. Pendekatan ini menghasilkan kerangka evaluasi multidimensional yang tidak hanya menghubungkan perubahan mikrostruktur adsorben dengan performa pemurnian CPO, tetapi juga memungkinkan identifikasi kondisi aktivasi optimum berdasarkan keseimbangan antara stabilitas struktur mineral, homogenitas partikel, dan kapasitas adsorptif terhadap senyawa pengotor minyak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Morfologi Permukaan Montmorillonit Setelah Aktivasi HCl

Karakterisasi morfologi permukaan montmorillonit menunjukkan bahwa variasi pH HCl menghasilkan transformasi struktur mikro yang berbeda pada setiap kondisi aktivasi. Perubahan tersebut terlihat dari tingkat keterbukaan pori, homogenitas distribusi partikel, dan pola aglomerasi yang diamati melalui citra SEM. Aktivasi asam memicu proses dealuminasi parsial pada lapisan silikat sehingga struktur permukaan mengalami reorganisasi secara bertahap sesuai intensitas keasaman sistem (Bergaya et al., 2006). Fenomena tersebut memperlihatkan bahwa kontrol pH memiliki pengaruh langsung terhadap kestabilan struktur montmorillonit selama proses aktivasi berlangsung.

Montmorillonit sebelum aktivasi memperlihatkan morfologi permukaan yang padat dengan partikel-partikel tidak beraturan dan saling menempel. Struktur yang masih tertutup menunjukkan bahwa pengotor mineral pada permukaan adsorben belum mengalami pelarutan secara optimal. Nilai mean length sebesar 1054,54 nm menunjukkan dominasi agregasi partikel dengan distribusi ukuran yang belum homogen. Karakteristik tersebut berkorelasi dengan rendahnya luas permukaan aktif yang tersedia untuk interaksi adsorptif terhadap senyawa polar pada CPO (Somorjai & Li, 2010).

Aktivasi pada pH 2 menghasilkan perubahan morfologi yang lebih agresif dibandingkan kondisi lainnya. Permukaan partikel terlihat lebih kasar dan menunjukkan pembentukan rongga-rongga mikro akibat pelarutan mineral pengotor yang berlangsung intensif. Intensitas keasaman tinggi meningkatkan pelepasan ion logam dari struktur montmorillonit sehingga proses pembukaan pori berlangsung cepat namun cenderung tidak stabil (Yariv & Cross, 2001). Kondisi tersebut memicu peningkatan aglomerasi partikel akibat perubahan keseimbangan muatan permukaan selama proses aktivasi berlangsung.

Karakteristik morfologi pada pH 4 memperlihatkan konfigurasi struktur yang lebih homogen dibandingkan sampel lainnya. Permukaan partikel tampak lebih terbuka dengan tingkat aglomerasi yang lebih rendah sehingga distribusi ukuran partikel menjadi lebih merata. Stabilitas struktur pada pH 4 menunjukkan bahwa intensitas aktivasi berada pada kondisi optimum untuk menghasilkan pembukaan pori tanpa menyebabkan kerusakan lapisan silikat secara berlebihan. Temuan ini sejalan dengan konsep optimasi aktivasi bentonit yang menyatakan bahwa kondisi asam moderat mampu meningkatkan kapasitas adsorptif melalui pembentukan situs aktif yang lebih stabil (Önal & Sarıkaya, 2021).

Aktivasi pada pH 6 memperlihatkan perubahan morfologi yang lebih terbatas dibandingkan perlakuan lainnya. Struktur partikel masih menunjukkan beberapa area padat dengan indikasi pori yang belum berkembang secara maksimal. Keasaman yang lebih rendah menyebabkan proses dealuminasi berlangsung lebih lambat sehingga transformasi permukaan tidak menghasilkan peningkatan luas permukaan aktif yang signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas aktivasi tidak hanya dipengaruhi oleh keberadaan asam, tetapi juga oleh intensitas interaksi proton dengan struktur mineral montmorillonit (Rodiansono & Abdullah, 2022).

Tabel 1. Distribusi Ukuran Partikel Montmorillonit Berdasarkan Variasi pH Aktivasi HCl

Sampel	Min. Length (nm)	Maks. Length (nm)	Mean Length (nm)
Sebelum Aktivasi	297,618	2371,421	1054,54
pH 2	424,264	4201,714	1505,65
pH 4	418,793	4362,654	1635,57
pH 6	599,328	3089,312	1260,52

Sumber: Data primer penelitian, 2026.

Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa aktivasi asam menghasilkan peningkatan nilai mean length pada seluruh variasi pH dibandingkan montmorillonit alami. Peningkatan tersebut menunjukkan terjadinya reorganisasi struktur partikel selama proses pengasaman berlangsung. Nilai mean length tertinggi pada pH 4 memperlihatkan bahwa pembukaan struktur berlangsung lebih stabil dibandingkan kondisi pH 2 yang cenderung menghasilkan deformasi permukaan ekstrem. Interpretasi tersebut

mendukung teori kimia permukaan yang menyatakan bahwa kondisi aktivasi moderat mampu menghasilkan keseimbangan antara pembentukan pori dan kestabilan partikel adsorben (Somorjai & Li, 2010).

Distribusi ukuran partikel yang lebih homogen pada pH 4 memperlihatkan keteraturan struktur mikro yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Pola homogenitas tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kontak permukaan antara adsorben dan molekul pengotor dalam sistem minyak. Pada kondisi pH 2, rentang ukuran partikel yang sangat lebar menunjukkan adanya ketidakstabilan struktur akibat proses pelarutan yang terlalu intensif. Fenomena tersebut konsisten dengan hasil penelitian Ajemba et al. (2024) yang menunjukkan bahwa aktivasi asam berlebihan dapat menurunkan efisiensi adsorpsi karena deformasi struktur mineral.

Karakteristik morfologi pada pH 6 menunjukkan bahwa pembukaan pori belum berlangsung optimal meskipun struktur partikel relatif lebih stabil. Permukaan adsorben masih memperlihatkan area tertutup yang mengindikasikan keberadaan pengotor mineral pada lapisan luar partikel. Keterbatasan pembentukan situs aktif pada kondisi ini menyebabkan luas permukaan efektif adsorben tidak berkembang secara maksimal. Hasil tersebut mendukung temuan Nweke dan Ajemba (2022) yang menyatakan bahwa efektivitas aktivasi bentonit sangat dipengaruhi oleh intensitas protonasi pada permukaan lempung.

Perubahan morfologi montmorillonit yang diamati melalui SEM memperlihatkan hubungan erat antara tingkat keasaman dan restrukturisasi permukaan adsorben. Intensitas aktivasi yang terlalu rendah menghasilkan pembukaan pori yang terbatas, sedangkan kondisi terlalu asam memicu kerusakan struktur parsial. Kondisi pH 4 menunjukkan keseimbangan terbaik antara keterbukaan permukaan dan stabilitas partikel sehingga menghasilkan konfigurasi struktur yang paling mendukung proses adsorpsi. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa optimasi pH aktivasi merupakan faktor kunci dalam pengembangan adsorben montmorillonit untuk aplikasi bleaching minyak sawit.

Efektivitas Bleaching Crude Palm Oil Berdasarkan Variasi pH Aktivasi Montmorillonit

Kualitas Crude Palm Oil dipengaruhi oleh kandungan asam lemak bebas, pigmen warna, fosfolipid, dan senyawa oksidatif yang terbentuk selama proses ekstraksi maupun penyimpanan minyak. Kandungan FFA yang tinggi mempercepat ketengikan minyak dan menurunkan stabilitas oksidatif sehingga proses bleaching menjadi tahapan penting dalam sistem refinery minyak sawit modern (Rosli et al., 2023). Pengujian performa bleaching pada penelitian ini difokuskan pada kemampuan montmorillonit teraktivasi HCl dalam menurunkan kadar FFA sebagai indikator utama kualitas minyak hasil pemurnian. Pendekatan tersebut relevan dengan konsep refining adsorptif yang menempatkan kualitas permukaan adsorben sebagai faktor utama dalam proses pemisahan senyawa polar dari matriks minyak (Shahidi, 2005).

Efektivitas bleaching menunjukkan variasi yang berbeda pada setiap kondisi aktivasi asam yang digunakan selama proses modifikasi montmorillonit. Aktivasi menggunakan HCl pada pH 4 menghasilkan performa adsorpsi paling stabil dibandingkan variasi pH lainnya karena menghasilkan penurunan FFA paling tinggi dengan kondisi minyak yang lebih jernih secara visual. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa keseimbangan antara pembentukan situs aktif dan kestabilan struktur adsorben berada pada rentang optimum saat aktivasi berlangsung pada pH menengah (Nweke & Ajemba, 2022). Interaksi adsorptif antara montmorillonit dan komponen polar CPO berlangsung lebih efektif ketika distribusi pusat aktif permukaan tidak mengalami kerusakan struktural berlebihan akibat perlakuan asam ekstrem.

Penurunan kadar FFA setelah bleaching menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara intensif selama kontak antara montmorillonit dan minyak sawit mentah. FFA dalam CPO memiliki karakter polar sehingga mudah berinteraksi dengan permukaan adsorben yang memiliki situs aktif bermuatan dan pori terbuka. Fenomena tersebut sesuai dengan prinsip kimia permukaan yang menjelaskan bahwa adsorpsi senyawa organik polar meningkat pada permukaan mineral dengan energi adsorpsi tinggi dan distribusi pori yang stabil (Somorjai & Li, 2010). Aktivasi asam memperbesar peluang interaksi tersebut melalui pelepasan sebagian ion logam dan penghilangan pengotor mineral pada lapisan montmorillonit.

Kondisi bleaching pada pH 2 menunjukkan bahwa peningkatan keasaman tidak selalu menghasilkan efektivitas adsorpsi yang lebih baik. Lingkungan asam yang terlalu kuat dapat menyebabkan dealuminasi berlebihan sehingga sebagian struktur montmorillonit mengalami

ketidakstabilan dan penurunan kapasitas adsorptif. Karakter tersebut menyebabkan sebagian situs aktif mengalami penurunan efisiensi interaksi terhadap FFA meskipun permukaan adsorben terlihat lebih reaktif secara kimiawi. Pola serupa juga ditemukan oleh Önal dan Sarıkaya (2021) yang menjelaskan bahwa aktivasi asam dengan intensitas tinggi dapat mengurangi stabilitas internal bentonit sehingga daya bleaching tidak meningkat secara proporsional.

Tabel 2. Efektivitas Bleaching CPO Menggunakan Montmorillonit Teraktivasi HCl

Variasi pH Aktivasi	Volume NaOH (mL)	Kadar FFA (%)	Penurunan FFA (%)	Efisiensi Bleaching
pH 2	1,4	1,792	89,47	Tinggi
pH 4	1,1	1,400	91,77	Sangat Tinggi
pH 6	1,2	1,500	91,18	Tinggi
CPO Awal	13,5	17,02	-	Rendah

Sumber: Data primer hasil uji titrasi asam–basa penelitian, 2026.

Data pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa aktivasi pH 4 menghasilkan kadar FFA paling rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Persentase penurunan FFA mencapai 91,77%, sedangkan pH 2 dan pH 6 masing-masing menghasilkan penurunan sebesar 89,47% dan 91,18%. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa efektivitas bleaching tidak hanya ditentukan oleh tingkat keasaman aktivator, tetapi juga oleh kestabilan struktur adsorben selama proses aktivasi. Ajemba et al. (2024) menjelaskan bahwa efisiensi bleaching optimum dicapai ketika proses aktivasi mampu menghasilkan keseimbangan antara luas permukaan aktif dan integritas struktur mineral lempung.

Kondisi pH 6 memperlihatkan efektivitas adsorpsi yang cukup tinggi, namun masih berada di bawah performa adsorben pH 4. Aktivasi yang berlangsung pada kondisi asam lebih lemah menyebabkan proses pembukaan situs aktif berlangsung lebih terbatas sehingga kemampuan adsorpsi terhadap senyawa polar tidak berkembang maksimal. Stabilitas struktur mineral memang relatif lebih baik pada kondisi ini, tetapi jumlah pusat aktif yang tersedia untuk interaksi dengan FFA menjadi lebih sedikit. Temuan tersebut sejalan dengan laporan Mana et al. (2007) yang menyatakan bahwa kapasitas adsorpsi bleaching earth sangat dipengaruhi oleh intensitas modifikasi permukaan selama aktivasi kimia.

Penurunan kadar FFA juga berkaitan erat dengan kemampuan adsorben dalam mengurangi senyawa oksidatif dan pigmen warna pada minyak sawit mentah. Adsorpsi pigmen karotenoid dan komponen hasil degradasi oksidatif meningkatkan kejernihan minyak sekaligus memperbaiki stabilitas penyimpanan produk hasil refining. Farhan dan Wardana (2023) menjelaskan bahwa efektivitas bleaching earth pada industri refinery minyak sawit sangat menentukan kualitas warna dan kestabilan minyak RBDPO. Karakteristik tersebut menjadikan optimasi aktivasi montmorillonit sebagai aspek penting dalam pengembangan adsorben berbasis lempung untuk industri minyak nabati.

Kinerja adsorpsi montmorillonit teraktivasi juga dipengaruhi oleh sifat kimia CPO yang mudah mengalami peningkatan FFA akibat hidrolisis trigliserida selama proses penanganan bahan baku. Kandungan air, suhu penyimpanan, dan waktu kontak oksidatif mempercepat pembentukan asam lemak bebas sehingga kualitas minyak awal sangat menentukan beban kerja adsorben selama bleaching (Emebu et al., 2022). Kondisi tersebut menjelaskan mengapa adsorben dengan distribusi situs aktif lebih stabil mampu menghasilkan penurunan FFA yang lebih signifikan. Interaksi antara gugus polar FFA dan pusat aktif montmorillonit menjadi lebih intensif ketika permukaan adsorben memiliki aksesibilitas pori yang baik.

Efektivitas bleaching pada penelitian ini juga mendukung perkembangan penggunaan adsorben mineral dalam proses pemurnian minyak berkelanjutan. Penggunaan montmorillonit teraktivasi memiliki keuntungan berupa ketersediaan material yang tinggi, biaya produksi relatif rendah, dan kemampuan regenerasi yang cukup baik pada sistem pengolahan minyak industri. Aritonang et al. (2024) menunjukkan bahwa kombinasi adsorben berbasis bentonit mampu meningkatkan kualitas minyak melalui mekanisme adsorpsi simultan terhadap senyawa warna dan komponen polar. Karakter tersebut memperkuat posisi montmorillonit sebagai bleaching earth alternatif yang potensial untuk sistem refinery berbasis adsorpsi ramah lingkungan.

Performa adsorpsi yang tinggi pada aktivasi pH 4 juga relevan terhadap pengembangan teknologi refining untuk kebutuhan biodiesel dan produk turunan minyak sawit lainnya. Minyak dengan kandungan FFA rendah memiliki stabilitas reaksi yang lebih baik pada proses transesterifikasi maupun hydrotreating karena meminimalkan pembentukan sabun dan residu reaksi samping (Zikri et al., 2025). Leofayuda et al. (2025) menjelaskan bahwa aktivasi berbasis HCl menghasilkan peningkatan kapasitas adsorptif yang lebih konsisten dibandingkan aktivator basa pada sistem pemurnian CPO. Pola tersebut memperlihatkan bahwa pengaturan kondisi aktivasi menjadi faktor penting dalam pengembangan adsorben untuk industri oleokimia modern.

Kapasitas bleaching montmorillonit juga berkaitan dengan kemampuan adsorben mempertahankan stabilitas minyak setelah proses pemurnian berlangsung. Spent bleaching earth yang memiliki kapasitas adsorpsi tinggi umumnya mengandung residu minyak lebih rendah sehingga kehilangan minyak selama refining dapat ditekan secara lebih efisien (Loh, 2006). Karakter tersebut penting dalam sistem produksi industri karena berkaitan langsung dengan efisiensi ekonomi dan pengurangan limbah proses. Arysandi et al. (2026) menegaskan bahwa kualitas tahap pretreatment minyak sangat memengaruhi performa lanjutan pada proses konversi biodiesel dan kestabilan mutu produk akhir.

Korelasi Struktur Permukaan Montmorillonit dan Kinerja Adsorpsi pada Bleaching CPO

Transformasi struktur permukaan montmorillonit akibat aktivasi HCl menunjukkan hubungan langsung terhadap performa adsorpsi pada proses bleaching CPO. Karakter morfologi yang lebih homogen meningkatkan probabilitas kontak antara permukaan adsorben dan senyawa polar dalam minyak sawit sehingga transfer massa berlangsung lebih efektif. Fenomena tersebut berkaitan dengan peningkatan jumlah situs aktif akibat proses dealuminasi parsial yang terjadi selama aktivasi asam, terutama pada kondisi keasaman menengah yang menjaga kestabilan lapisan silikat montmorillonit (Bergaya et al., 2006). Stabilitas struktur mineral menjadi faktor penting karena pembukaan pori yang terlalu agresif justru dapat menurunkan integritas adsorben dan mengurangi kapasitas adsorpsi jangka pendek maupun jangka panjang.

Interaksi antara struktur permukaan dan kemampuan penyerapan senyawa pengotor dipengaruhi oleh distribusi partikel adsorben selama proses bleaching berlangsung. Permukaan yang lebih seragam menghasilkan difusi senyawa polar yang lebih stabil sehingga penyerapan asam lemak bebas dan pigmen oksidatif berlangsung lebih merata. Somorjai dan Li (2010) menjelaskan bahwa adsorpsi pada material berlapis sangat dipengaruhi oleh distribusi energi permukaan dan keberadaan pusat protonasi aktif yang terbentuk setelah perlakuan asam. Kondisi ini menjelaskan mengapa montmorillonit dengan keterbukaan pori yang seimbang memperlihatkan performa bleaching lebih stabil dibandingkan adsorben dengan struktur terlalu padat maupun terlalu terdegradasi.

Keseimbangan antara pembukaan pori dan stabilitas struktur menjadi aspek kritis dalam optimasi bleaching earth berbasis montmorillonit. Aktivasi pada kondisi asam moderat menghasilkan peningkatan luas permukaan tanpa merusak jaringan kristal secara berlebihan sehingga kemampuan adsorpsi terhadap molekul polar tetap terjaga. Yariv dan Cross (2001) menyatakan bahwa protonasi permukaan lempung meningkatkan afinitas terhadap gugus organik bermuatan parsial melalui interaksi elektrostatik dan van der Waals. Mekanisme tersebut berperan penting dalam penurunan kandungan pengotor pada CPO karena senyawa oksidatif dan asam lemak bebas memiliki polaritas yang cukup tinggi untuk berinteraksi dengan situs aktif montmorillonit.

Hubungan antara homogenitas morfologi dan efisiensi bleaching memperlihatkan bahwa distribusi partikel yang lebih stabil menghasilkan kontak adsorptif yang lebih intensif selama proses pemurnian berlangsung. Struktur partikel yang tidak terlalu teraglomerasi memungkinkan penetrasi minyak ke area internal adsorben menjadi lebih efektif sehingga transfer pengotor berlangsung lebih cepat. Önal dan Sarıkaya (2012) menegaskan bahwa radius nanopori pada bentonit teraktivasi menentukan kapasitas bleaching karena ukuran pori memengaruhi aksesibilitas molekul pengotor menuju situs aktif. Pola tersebut memperlihatkan bahwa performa adsorben tidak hanya ditentukan oleh luas permukaan, tetapi juga oleh keterhubungan antarpori dan homogenitas struktur permukaan.

Tabel 3. Hubungan Morfologi Permukaan dan Efektivitas Adsorpsi Montmorillonit pada Bleaching CPO

Variasi pH	Karakter Morfologi Dominan	Stabilitas Struktur	Homogenitas Permukaan	Intensitas Adsorpsi	Interpretasi Adsorptif
Sebelum aktivasi	Permukaan padat dan tertutup	Tinggi namun pasif	Rendah	Lemah	Situs aktif masih tertutup pengotor mineral
pH 2	Permukaan kasar dengan degradasi parsial	Rendah	Tidak stabil	Sedang	Pembukaan pori tinggi tetapi terjadi aglomerasi
pH 4	Permukaan terbuka dan merata	Stabil	Tinggi	Sangat kuat	Keseimbangan optimum antara porositas dan stabilitas
pH 6	Pembukaan pori terbatas	Relatif stabil	Sedang	Cukup kuat	Aktivasi kurang intensif sehingga situs aktif terbatas

Sumber: Interpretasi hasil karakterisasi SEM dan efektivitas bleaching penelitian, dianalisis berdasarkan konsep adsorpsi Önal dan Sarikaya (2021) serta Ajemba et al. (2024).

Sintesis pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa efektivitas adsorpsi lebih dipengaruhi oleh kualitas struktur permukaan dibandingkan tingkat keasaman ekstrem semata. Kondisi aktivasi yang terlalu asam menghasilkan pembukaan pori yang besar namun memicu degradasi sebagian lapisan mineral sehingga stabilitas adsorben menurun. Önal dan Sarikaya (2021) menjelaskan bahwa aktivasi asam optimum dicapai ketika proses dealuminasi berlangsung terkendali dan tidak menyebabkan kerusakan struktur berlapis bentonit. Karakter tersebut terlihat pada adsorben dengan morfologi homogen yang mampu mempertahankan kapasitas adsorpsi secara lebih konsisten selama proses bleaching berlangsung.

Kinerja adsorpsi montmorillonit juga dipengaruhi oleh distribusi energi permukaan yang terbentuk setelah aktivasi HCl. Permukaan yang lebih homogen memiliki kepadatan situs aktif yang lebih merata sehingga interaksi adsorptif terhadap senyawa pengotor berlangsung lebih efisien. Mana et al. (2007) menjelaskan bahwa peningkatan keterbukaan struktur adsorben memperbesar kapasitas penjerapan molekul organik melalui mekanisme difusi intrapartikel dan adsorpsi permukaan simultan. Karakter tersebut menjelaskan mengapa struktur yang terlalu teraglomerasi cenderung menurunkan efektivitas bleaching meskipun memiliki tingkat keasaman yang tinggi.

Korelasi antara struktur montmorillonit dan penurunan senyawa polar dalam CPO berkaitan erat dengan perubahan sifat kimia permukaan setelah aktivasi. Protonasi pada lapisan silikat meningkatkan afinitas adsorben terhadap gugus karboksilat dan senyawa oksidatif yang terdapat dalam minyak sawit mentah. Putri et al. (2022) menunjukkan bahwa material berbasis montmorillonit teraktivasi memiliki kemampuan katalitik dan adsorptif yang meningkat akibat pembentukan situs asam Bronsted pada permukaan mineral. Interaksi tersebut memperkuat mekanisme penurunan senyawa pengotor melalui kombinasi adsorpsi fisik dan interaksi kimia permukaan.

Stabilitas struktur adsorben memiliki implikasi penting terhadap pengembangan bleaching earth berkelanjutan pada industri minyak sawit modern. Adsorben dengan struktur yang stabil lebih mudah diregenerasi dan memiliki potensi penggunaan ulang yang lebih tinggi dibandingkan material yang mengalami degradasi ekstrem. Rahmawati et al. (2024) menjelaskan bahwa material berbasis spent bleaching earth masih memiliki potensi aplikasi lingkungan apabila struktur mineralnya tetap terjaga setelah proses adsorpsi berlangsung. Perspektif tersebut menunjukkan bahwa optimasi pH aktivasi tidak

hanya berkaitan dengan efisiensi bleaching, tetapi juga keberlanjutan penggunaan adsorben pada sistem industri terpadu.

Pengembangan adsorben berbasis montmorillonit teraktivasi juga memiliki relevansi terhadap produksi bahan bakar terbarukan berbasis CPO. Struktur adsorben yang mampu menurunkan senyawa polar dan pengotor oksidatif dapat meningkatkan kualitas bahan baku untuk proses hidrotreating dan green diesel. Zikri et al. (2025) menjelaskan bahwa kestabilan kualitas CPO sebelum proses katalitik sangat menentukan performa konversi pada produksi bahan bakar berbasis minyak sawit. Karakter adsorben dengan stabilitas pori yang baik memberikan keuntungan karena dapat mempertahankan mutu minyak tanpa meningkatkan degradasi termal selama pretreatment berlangsung.

Interpretasi ilmiah terhadap hubungan morfologi dan performa bleaching memperlihatkan bahwa aktivasi asam bukan hanya proses pembukaan pori, tetapi juga rekonstruksi kimia permukaan montmorillonit. Rodiansono dan Abdullah (2022) menjelaskan bahwa efektivitas adsorben dipengaruhi oleh keseimbangan antara luas permukaan, distribusi situs aktif, dan kestabilan struktur kristal pada material padat. Pola hubungan tersebut memperlihatkan bahwa struktur yang terlalu kompak membatasi difusi pengotor, sedangkan struktur yang terlalu rusak mengurangi integritas adsorben selama kontak dengan minyak. Sintesis ini menempatkan aktivasi pH moderat sebagai pendekatan paling rasional dalam pengembangan bleaching earth berbasis montmorillonit untuk aplikasi industri CPO berkelanjutan.

KESIMPULAN

Variasi pH HCl dalam proses pengasaman montmorillonit memberikan pengaruh signifikan terhadap transformasi morfologi permukaan, distribusi partikel, pembentukan situs aktif, dan efektivitas adsorpsi pada proses bleaching Crude Palm Oil (CPO). Karakterisasi SEM menunjukkan bahwa aktivasi asam mampu meningkatkan keterbukaan permukaan adsorben melalui mekanisme dealuminasi parsial dan penghilangan pengotor mineral, namun intensitas aktivasi yang terlalu tinggi memicu aglomerasi serta degradasi struktur yang menurunkan kestabilan adsorben. Kondisi pH 4 menghasilkan struktur permukaan paling homogen dengan keseimbangan optimum antara pembukaan pori dan stabilitas mineral sehingga menghasilkan performa adsorpsi paling efektif terhadap senyawa polar dan asam lemak bebas pada CPO. Korelasi antara homogenitas morfologi, distribusi ukuran partikel, dan kapasitas adsorptif memperlihatkan bahwa efektivitas bleaching tidak hanya ditentukan oleh tingkat keasaman aktivasi, tetapi juga oleh kualitas rekonstruksi kimia permukaan montmorillonit. Pembentukan situs protonasi aktif meningkatkan interaksi adsorben dengan molekul pengotor minyak melalui mekanisme adsorpsi fisik dan kimia permukaan secara simultan. Temuan ini memperkuat relevansi optimasi aktivasi asam dalam pengembangan bleaching earth berbasis mineral lempung yang lebih efisien, stabil, dan berkelanjutan untuk aplikasi pemurnian minyak sawit serta pretreatment bahan baku industri oleokimia dan bioenergi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajemba, R. O., Nweke, C. N., Uzochukwu, J. S., & Chimelogo, E. C. (2024). *Optimum bleaching efficiency of activated Ntezi bentonite using response surface methodology*. *Journal of Biomedical Research & Environmental Sciences*, 5(5), 420–429. <https://doi.org/10.37871/jbres1910>
- Aritonang, B., Ritonga, A. H., Harefa, K., & Wiratma, D. Y. (2024). Purification of used Cooking Oil using a Combination of Activated Carbon and Bentonite Adsorbents. *Jurnal Farmasimed (JFM)*, 7(1), 31-40. <https://doi.org/10.35451/jfm.v7i1.2331>
- Arysandi, D., Arirohman, I. D., Zen, M. R., & Suhartoyo, A. (2026). Effect Of Bleaching Earth Addition In The Pretreatment Of Used Cooking Oil On Biodiesel Quality. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 11(1), 46-55. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v11i1.826>
- Bergaya, F., Theng, B. K. G., & Lagaly, G. (Eds.). (2006). *Handbook of Clay Science*. Elsevier.
- Emebu, S., Osaikhuiwuomwan, O., Mankonen, A., Udoye, C., Okieimen, C., & Janáčová, D. (2022). *Influence of moisture content, temperature, and time on free fatty acid in stored crude palm oil*. *Scientific Reports*, 12, 9846. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13998-1>
- Farhan, A., & Wardana, A. (2023, October). Analisis Pemakaian Jumlah Bleaching Earth Terhadap Kualitas Warna RBDPO (Refined Bleached Deodorized Palm Oil) Pada Proses Refinery di PT.

- XYZ. In *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)* (Vol. 6, No. 1, pp. 120-123). <https://doi.org/10.32734/ee.v6i1.1794>
- Leofayuda, M. S., Aisyadah, U., Nuraini, S., Agustia, R., Zahara, P. J., Anika, A. D., & Lestari, I. (2025). Comparative Effectiveness Of Activator Hcl And Naoh On Palm Shell Activated Carbon In Crude Palm Oil (Cpo) Refining. *Spin Jurnal Kimia & Pendidikan Kimia*, 7(2), 187-196. <https://doi.org/10.20414/spin.v7i2.14518>
- Loh, S. K. (2006). *A study of residual oils recovered from spent bleaching earth: Their characteristics and applications*. *American Journal of Applied Sciences*, 3(10), 2063–2067. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2006.2063.2075>
- Mana, M., Ouali, M.-S., & de Menorval, L. C. (2007). *Removal of basic dyes from aqueous solutions with a treated spent bleaching earth*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 307(1), 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.11.019>
- Nweke, C. N., & Ajemba, R. O. (2022). *Clay characterization and bleaching of crude palm oil using acid-activated Nibo clay*. *Bioremediation Science and Technology Research*, 10(1), 14–21. <https://doi.org/10.54987/bstr.v10i1.683>
- Önal, M., & Sarıkaya, Y. (2012). *Maximum bleaching of vegetable oils by acid-activated bentonite: Influence of nanopore radius*. *Adsorption Science & Technology*, 30(1), 97–108. <https://doi.org/10.1260/0263-6174.30.1.97>
- Önal, M., & Sarıkaya, Y. (2021). *Optimization of bleaching power by sulfuric acid activation of bentonite*. *Clay Minerals*, 56(2), 148–155. <https://doi.org/10.1180/clm.2021.28>
- Putri, F. P., Hairiyah, N., & Ariani, T. (2025). Optimasi Konsentrasi Asam Asetat Dalam Formulasi Food-Grade Grease (Fgg) Berbasis Crude Palm Oil (CPO). *JURNAL INTEGRASI PROSES*, 14(2), 296-304. <https://dx.doi.org/10.62870/jip.v14i2.35691>
- Putri, Q. U., Augustin, D., & Hasanudin, H. (2022). Kinetika Esterifikasi Asam Lemak Bebas dari Sludge Industri Crude Palm Oil (CPO) Menggunakan Katalis Komposit Montmorillonite/Karbon Tersulfonasi dari Tetes Tebu. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 18(1), 48-57. <https://doi.org/10.20961/alchemy.18.1.50470.48-57>
- Rahmawati, R., Nigravita, A. N., Larasati, I., Mahafani, R. H., Syafutra, R., & Sunardi, S. (2024). Peat Water Treatment with Magnetic Carbon/Clay Composite from Spent Bleaching Earth Palm Oil Processing Waste. *Nusantara Journal of Science and Technology*, 1(1), 1-5. <https://doi.org/10.69959/nujst.v1i1.7>
- Rodiansono, S. S., & Abdullah, S. S. (2022). *Buku Ajar Kimia Katalis dan Permukaan-Rajawali Pers*. PT. RajaGrafindo Persada.
- Rosli, N. L., Ku Halim, K. H., & Alias, R. (2023). *Crude palm oil physicochemical and quality characterisation*. *Advances in Science and Technology Global Sustainability and Chemical Engineering*, 43–52. <https://doi.org/10.4028/p-j4n815>
- Shahidi, F. (Ed.). (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (6th ed.). Wiley.
- Sinaga, M., Kurniawan, I., & Masriatini, R. (2025). Proses Pemucatan Crude Palm Oil Dengan Recovery Reactivated Spent Bleaching Earth (RSBE). *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 10(4), 37-43. <https://doi.org/10.31942/inteka.v10i4.14501>
- Somorjai, G. A., & Li, Y. (2010). *Introduction to Surface Chemistry and Catalysis* (2nd ed.). Wiley.
- Tan, B. A., Nair, A., Zakaria, M. I. S., Low, J. Y. S., Kua, S. F., Koo, K. L., Wong, Y. C., Neoh, B. K., Lim, C. M., & Appleton, D. R. (2023). *Free fatty acid formation points in palm oil processing and the impact on oil quality*. *Agriculture*, 13(5), 957. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050957>
- Yariv, S., & Cross, H. (2001). *Organo-Clay Complexes and Interactions*. Marcel Dekker.
- Zikri, A., Effendy, S., Maretha, D. S., Sulastri, N. S., & Syafitri, N. (2025). Produksi Green Diesel dari Crude Palm Oil melalui proses hydrotreating dengan katalis Ni/Bentonit. *Jurnal Penelitian Sains*, 27(1), 1-6. <https://doi.org/10.56064/jps.v27i1.1061>