

**PENGOLAHAN LIMBAH TEKSTIL (*METHYLENE BLUE*) MENGGUNAKAN
ADSORBEN KARBON AKTIF KULIT MANGGIS (*GARCINIA MANGOSTANA*)
TERAKTIVASI HIDROGEN PEROXIDE**

Suhirman^{1*}, Rizky Ibnufaatih Arvianto², Arfando Yudha Pradana³, Panji Wijaya⁴

^{1,2}Politeknik Industri Petrokimia Banten, Serang-Indonesia

Jl. Raya Karang Bolong, Cikoneng, Kec. Anyar, Kabupaten Serang, Banten 42166

^{3,4}Sekolah Tinggi Teknologi Fatahillah Cilegon, Serang-Indonesia

Jl. Raya Waringin Kurung, Serdang, Kec. Kramatwatu, Kabupaten Serang, Banten 42161

*e-mail koresponden: suhirman.suhirman@poltek-petrokimia.ac.id; suhirmansttfcilegon@gmail.com

Abstrak

Limbah industri tekstil merupakan salah satu sumber utama pencemaran lingkungan perairan akibat kandungan zat warna sintetis seperti *Methylene Blue* (MB) yang bersifat toksik, persisten, dan sulit terdegradasi secara hayati. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaraktisasi karbon aktif yang disintesis dari limbah kulit manggis (*Garcinia mangostana*) dan diaktivasi menggunakan hidrogen peroksida (H_2O_2) guna meningkatkan luas permukaan serta sifat hidrofiliknya, sehingga mampu mengadsorpsi zat warna *Methylene Blue* dari larutan air secara lebih efektif. Karbon aktif dibuat melalui proses karbonisasi hingga suhu $850^\circ C$ dan aktivasi kimia dengan larutan H_2O_2 50% yang diencerkan. Uji adsorpsi dilakukan dengan mencampurkan 50 mg karbon aktif ke dalam 250 mL larutan MB berkonsentrasi 50 ppm selama 120 menit, dengan analisis konsentrasi menggunakan Spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 663 nm. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa aktivasi dengan H_2O_2 meningkatkan luas permukaan spesifik karbon aktif kulit manggis dari $522\text{ m}^2/\text{g}$ menjadi $700\text{ m}^2/\text{g}$ serta memperkaya gugus fungsi oksigen seperti hidroksil dan karbonil pada permukaan karbon. Aktivasi ini juga menyebabkan penurunan sudut kontak dari $134,01^\circ$ menjadi $55,83^\circ$, menunjukkan peningkatan sifat hidrofilik yang signifikan. Proses adsorpsi menunjukkan efisiensi penurunan konsentrasi MB hingga 68% menggunakan karbon aktif teraktivasi (KA-ActLKM), jauh lebih tinggi dibandingkan karbon non-aktivasi (16%). KA-ActLKM mengikuti pendekatan pseudo second-order. Hasil fitting menunjukkan bahwa model pseudo second-order memberikan koefisien determinasi (R^2) yang tinggi baik untuk KA-LKM ($R^2 = 0,988$) maupun KA-ActLKM ($R^2 = 0,988$). Dengan demikian, penggunaan H_2O_2 sebagai agen aktivasi karbon aktif kulit manggis (KA-ActLKM) terbukti meningkatkan kinerja adsorpsi sekaligus menjamin keberlanjutan proses, karena senyawa ini bersifat *environmentally benign* dan terdekomposisi menjadi produk non-toksik berupa air dan oksigen.

Kata kunci: Kulit manggis, hidrogen peroksida, *Methylene Blue*, adsorpsi

Abstract

Textile wastewater is a major contributor to aquatic pollution because synthetic dyes such as *Methylene Blue* (MB) are toxic, persistent, and resistant to biodegradation. This study investigates the adsorption performance of activated carbon derived from mangosteen peel (*Garcinia mangostana*) activated with hydrogen peroxide (H_2O_2) for MB removal from aqueous solution. Activated carbon was prepared by carbonization at $850^\circ C$, followed by chemical activation with diluted 50% H_2O_2 . Adsorption tests were performed using 50 mg of adsorbent in 250 mL of MB solution (50 ppm) for 120 min, and residual concentrations were determined by UV-Vis spectrophotometry at 663 nm. H_2O_2 activation enhanced the specific surface area from 522 to $700\text{ m}^2/\text{g}$ and enriched oxygen-containing functional groups ($-OH$, $C=O$) on the carbon surface. The contact angle decreased from $134,01^\circ$ to $55,83^\circ$, indicating improved hydrophilicity. The activated carbon achieved 68% MB removal, significantly higher than the non-activated carbon (16%). Adsorption kinetics were well described by the pseudo-second-order model, with a high determination coefficient ($R^2 = 0.988$).

Keywords: Mangosteen peel, hydrogen peroxide, *Methylene Blue*, adsorption

1. PENDAHULUAN

Industri tekstil merupakan salah satu sektor yang berkembang pesat dan memberikan kontribusi ekonomi signifikan di banyak

negara, termasuk Indonesia. Namun, di balik pertumbuhannya yang pesat, industri ini juga dikenal sebagai salah satu penghasil limbah cair paling mencemari lingkungan. Salah satu jenis

polutan utama dalam limbah cair tekstil adalah zat warna sintetis, terutama *Methylene Blue* (MB), yang termasuk golongan pewarna kationik. Zat ini bersifat toksik, persisten, dan sangat sulit terdegradasi secara hayati, sehingga keberadaannya dalam lingkungan perairan dapat menyebabkan berbagai gangguan ekosistem dan kesehatan manusia (Yaseen & Scholz, 2019).

Industri petrokimia merupakan tulang punggung bagi produksi berbagai senyawa kimia dasar yang menjadi bahan baku dalam sektor tekstil, farmasi, plastik, dan pewarna. Salah satu produk turunan dari proses petrokimia yang banyak digunakan adalah *Methylene Blue* (MB), sebuah zat warna sintetis dari golongan fenotiazina. MB disintesis dari anilin, yang berasal dari benzena, salah satu senyawa aromatik utama hasil distilasi fraksional minyak bumi (Yaseen & Scholz, 2019). *Methylene Blue* memiliki struktur aromatik kompleks yang membuatnya stabil terhadap cahaya, panas, dan agen pengoksidasi.

Keberadaan zat ini di perairan tidak hanya mengubah warna air, tetapi juga mengurangi penetrasi cahaya matahari, menghambat fotosintesis organisme air, serta berpotensi menimbulkan efek karsinogenik dan mutagenik (Al-Tohamy et al., 2022; Katheresan et al., 2018). Pada manusia, paparan jangka panjang terhadap MB dapat menyebabkan iritasi kulit, luka kornea, gangguan pernapasan, bahkan kerusakan jaringan (Khan et al., 2022). Oleh karena itu, pengolahan limbah cair tekstil yang mengandung MB menjadi perhatian penting dalam upaya pelestarian lingkungan.

Sejumlah metode telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan MB dalam air limbah, antara lain koagulasi-flokulasi (Ihaddaden et al., 2022), ozonasi (Hassaan & Nemr, 2017), elektrokoagulasi (Hasnaoui et al., 2024), fotokatalisis (Aritonang et al., 2022), filtrasi membran (Zhu et al., 2023), dan pertukaran ion (Kusuma et al., 2024). Namun, sebagian besar metode tersebut memerlukan biaya tinggi, energi besar, serta menghasilkan lumpur residu yang sulit ditangani. Dalam konteks ini, teknologi adsorpsi muncul sebagai metode alternatif yang lebih efisien, murah, mudah dioperasikan, dan tidak menghasilkan produk samping berbahaya (Haleem et al., 2023).

Adsorpsi menggunakan karbon aktif menjadi solusi populer dalam pengolahan air limbah karena kemampuan adsorptifnya yang

tinggi dan fleksibilitas bahan bakunya. Saat ini, terdapat potensi pemanfaatan limbah biomassa pertanian sebagai sumber karbon aktif karena lebih ekonomis dan ramah lingkungan (Soffian et al., 2022). Beberapa biomassa yang telah dimanfaatkan antara lain tempurung kelapa (Sujiono et al., 2022), ampas tebu (Beyan et al., 2021), jerami padi (Khoshnood Motlagh et al., 2021), dan kulit buah-buahan (Tolkou et al., 2024).

Kulit manggis (*Garcinia mangostana*), sebagai limbah pertanian yang melimpah di Indonesia, mengandung lignoselulosa tinggi yang menjadikannya bahan baku ideal untuk produksi karbon aktif. Kandungan utama kulit manggis seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, berkontribusi terhadap pembentukan struktur pori pada karbon (Khajonrit et al., 2022). Selain itu, senyawa polifenol dan xanthone yang terdapat dalam kulit manggis dapat memperkaya permukaan karbon aktif dengan gugus fungsional aktif yang mendukung proses adsorpsi terhadap polutan organik seperti MB (Yuvanatemiya et al., 2022).

Meskipun karbon aktif dapat dibuat secara fisik melalui karbonisasi, peningkatan kapasitas adsorpsinya dapat dicapai dengan aktivasi kimia. Proses aktivasi bertujuan memperluas permukaan spesifik karbon dan memperkaya gugus fungsional aktif seperti $-OH$, $-COOH$, dan $C=O$ pada permukaannya (Zhang et al., 2021). Hidrogen peroksida (H_2O_2) merupakan salah satu agen aktivasi kimia yang ramah lingkungan karena tidak menghasilkan residu logam berat atau anorganik yang sulit ditangani (Rigoletto et al., 2024).

Aktivasi menggunakan H_2O_2 terbukti mampu meningkatkan hidrofilisitas (Liepins et al., 2024; Vatanpour et al., 2021) dan kemampuan adsorpsi karbon aktif (Zhang et al., 2021). Gugus fungsional oksigen yang terbentuk selama aktivasi dapat berikatan dengan molekul MB melalui interaksi elektrostatik maupun ikatan hidrogen, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan (Zhou et al., 2020; Farooq et al., 2018). Penelitian Jameel et al. (2019) menunjukkan bahwa karbon aktif dari kulit pisang yang diaktivasi H_2O_2 mampu menyerap hingga 85% MB dalam waktu 90 menit. Hasil serupa juga menggunakan kulit durian sebagai bahan baku karbon aktif teraktivasi (Nugroho et al., 2023).

Dalam studi adsorpsi, memahami laju dan mekanisme adsorpsi sangat penting untuk merancang sistem pengolahan air limbah yang

efisien. Oleh karena itu, pendekatan kinetika digunakan untuk menganalisis bagaimana molekul polutan seperti *Methylene Blue* (MB) berinteraksi dengan permukaan adsorben seperti karbon aktif dari kulit manggis dalam rentang waktu tertentu. Model kinetika menggambarkan bagaimana kecepatan adsorpsi berubah terhadap waktu, serta mengindikasikan apakah proses yang dominan bersifat fisik (fisisorpsi) atau kimia (kemisorpsi) (Musah et al., 2022). Persamaan kinetika adsorpsi dibagi menjadi dua, yaitu model kinetika *pseudo-first-order* dan model kinetika *pseudo-second-order*.

Model Kinetika *Pseudo-First-Order* ini pertama kali dikembangkan oleh Lagergren dan menggambarkan proses adsorpsi fisis berdasarkan asumsi bahwa laju pengikatan adsorbat berbanding lurus dengan selisih antara kapasitas adsorpsi pada kesetimbangan dan pada waktu tertentu (López-Luna et al., 2019). Model *pseudo-second-order*, dikembangkan oleh Ho dan McKay, mengasumsikan bahwa laju adsorpsi sebanding dengan kuadrat dari jumlah situs aktif yang tersedia. Model ini banyak digunakan karena menghasilkan kecocokan data eksperimen yang baik, khususnya pada sistem di mana terjadi *chemisorption* atau pembentukan ikatan kimia antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben (López-Luna et al., 2019). Persamaan kinetika adsorpsi ditunjukkan apabila R^2 semakin mendekati 1. Hal ini menunjukkan data yang diperoleh memiliki keseragaman atau pola linier yang sangat baik (Revellame et al., 2020).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Pembuatan Karbon Aktif Limbah Kulit Manggis (KA-LKM)

Limbah Kulit Manggis (LKM) dalam kondisi kering diperoleh dari Banten Indonesia dikarbonisasi dalam furnace dari suhu ruangan hingga 850°C. Pada saat suhu mencapai 60°C sampai 850°C dilakukan gasifikasi parsial menggunakan steam. Hasil gasifikasi akhir ukuran 20-40 mesh disebut dengan karbon aktif limbah kulit manggis (Suhirman et al., 2021).

2.2 Aktivasi Karbon Aktif Limbah Kulit Manggis (KA-LKM)

Karbon aktif limbah kulit manggis dicampurkan kedalam larutan H_2O_2 pada perbandingan (1:10). Larutan H_2O_2 yang digunakan yaitu H_2O_2 50% sebanyak 15,65 ml diencerkan menggunakan akuades sebanyak 35 ml. Setelah

KA-LKM disaring selanjutnya dikeringkan didalam desikator selama 24 jam dan didalam oven pada suhu 110 °C selama 8 jam. Hasil akhir berupa karbon aktif limbah kulit manggis teraktivasi (KA-ActLKM) (Suhirman., 2023).

2.3 Preparasi Larutan Uji

Membuat larutan zat warna *Methylene Blue* dengan kadar konsentrasi 50 ppm. Menimbang zat warna *Methylene Blue* lalu mencampurkan dengan akuades pada beaker glass. Rumus yang digunakan dalam pembuatan larutan uji tersebut adalah berat zat terlarut (*Methylene Blue*) dibagi dengan berat larutan dikali 10 pangkat 6. Atau sebesar 0,05 mg per 1 lt larutan akuades (Al-Ghouti & Al-Absi, 2020).

2.4 Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan dengan memasukkan 50 mg KA-ActLKM kedalam larutan uji sebanyak 250 ml. Dimana dilakukan pengadukan selama 120 menit di 60 rpm pada suhu ruang. Pada menit ke 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 105 dan 120 dilakukan pengambilan sampel sebesar 2 ml untuk dianalisis dengan Spektrofotometer UV-Vis dengan panjang gelombang 663 nm (Kuntari, dkk. 2017).

2.2 Perhitungan Removal Limbah *Methylene Blue*

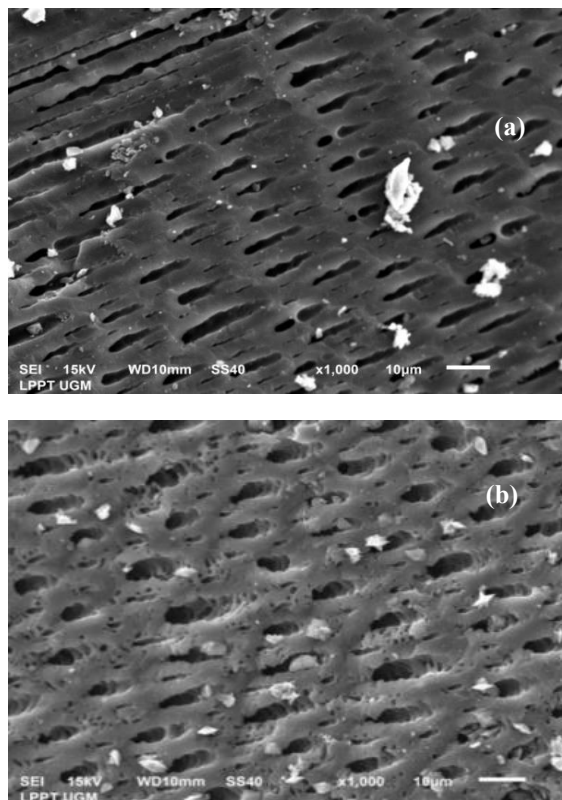
Mengukur Limbah sintetik jenis *Methylene Blue* pada menit ke 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 105 dan 120 menggunakan Spektrofotometer dengan panjang gelombang 663 nm. Membuat kurva hubungan antara absorbansi dengan waktu operasional. Pembuatan larutan standar *Methylene Blue* dengan konsentrasi 0,25, 50, 75 dan 100 ppm. Kemudian diukur absorbansi masing – masing larutan pada panjang gelombang 663 nm dengan alat Spektrofotometer UV-Vis. Hasil yang didapat kemudian dibuat kurva standar yang menyatakan hubungan konsentrasi dan absorbansi, maka diperoleh persamaan $y = ax + b$. Dari hasil yang telah diperoleh dan yang telah dikonversi menjadi satuan konsentrasi (ppm).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik KA-LKM dan KA-ActLKM

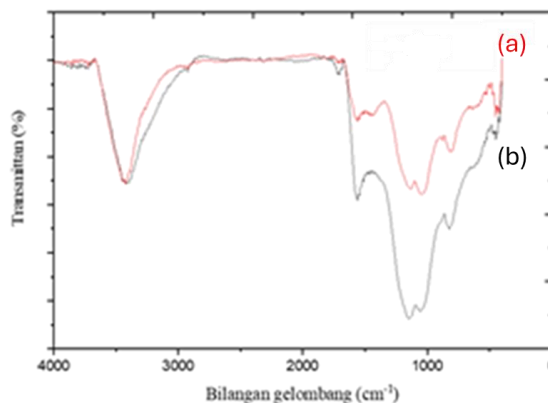
Berdasarkan hasil analisa *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap Karbon aktif limbah kulit manggis yang tidak dikenai perlakuan oksidasi dengan H_2O_2 (KA-LKM)

menunjukkan permukaan yang cenderung rapat dengan pori-pori permukaan yang sempit sesuai Gambar 3.1a. Sedangkan setelah dilakukan perlakuan oksidasi dengan H_2O_2 menunjukkan permukaan yang cenderung berongga dengan pori-pori permukaan yang lebih lebar sesuai Gambar 3.1b



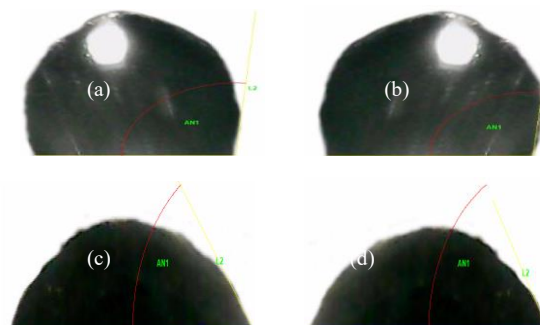
Gambar 3.1 Hasil analisa *Scanning Electron Microscope* (SEM) (a) KA-LKM dan (b) KA-ActLKM

Karakterisasi KA-LKM menggunakan *Surface Area Analyzer* (SAA) menunjukkan bahwa KA-LKM memiliki luas permukaan spesifik $522 \text{ m}^2/\text{g}$ dan luas mikropori 60%. Analisis FTIR KA-LKM pada panjang gelombang 500–4.000 nm terdapat gugus fungsi asam karboksilat kuat, karboksilat dan hidroksil pada KA-LKM. Setelah dilakukan perlakuan oksidasi dengan H_2O_2 (KA-ActLKM) memiliki luas permukaan spesifik $700 \text{ m}^2/\text{g}$ dan luas mikropori 80%. KA-ActLKM terdapat gugus fungsi C-O, C=O, O-H memiliki jumlah atom oksigen lebih banyak dibandingkan tanpa diberikan pra-perlakuan oksidasi seperti pada Gambar 3.2. Hal ini dapat dibuktikan dengan peningkatan lebar dan intensitas puncak serapan FTIR setelah perlakuan oksidasi dengan H_2O_2 (gambar 3.2b).



Gambar 3.2. Hasil analisis FTIR (a) KA-LKM dan (b) KA-ActLKM

KA-LKM memiliki sudut kontak yaitu sebesar $134,01^\circ$ sesuai Gambar 3.3 (a) dan Gambar 3.3 (b). Menurut klasifikasi IUPAC bahwa KA-LKM tergolong ke dalam *nanoporous material* yang memiliki sifat hidrofobik karena memiliki sudut kontak $> 90^\circ$ (Muttakin *et al.*, 2018). KA-LKM dikenai pra-perlakuan oksidasi dengan H_2O_2 (KA-ActLKM) memiliki sudut kontak $55,83^\circ$. Sudut kontak sebelah kiri $52,87^\circ$ dan sudut kontak sebelah kanan $58,78^\circ$. Menurut klasifikasi IUPAC karbon aktif tempurung kelapa sawit dikenai pra-perlakuan oksidasi dengan H_2O_2 tergolong bersifat hidrofilik karena memiliki sudut kontak lebih rendah dari 90° . sesuai Gambar 3.3 (c) dan Gambar 3.3 (d).



Gambar 3.3 Sudut kontak KA-LKM (a) dan (b) sedangkan (c) dan (d) KA-ActLKM

3.2 Kemampuan KA-LKM dan KA-ActLKM Terhadap *Methylene Blue*

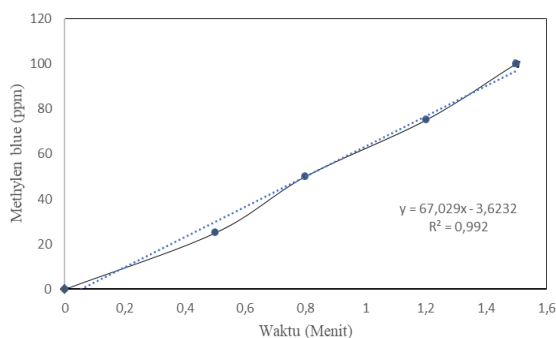
Penelitian ini dilakukan untuk menguji kemampuan karbon aktif limbah kulit manggis teraktivasi H_2O_2 (KA-ActLKM) dalam menyerap zat warna *Methylene Blue* dari air. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Kimia Dasar Universitas Sultan Ageng Tirtayasa dan Sekolah Tinggi Teknologi Fatahillah Cilegon.

Larutan *Methylene Blue* memiliki konsentrasi awal sebesar 12,5 mg/L dengan volume total 250 mL. Pengambilan sampel dilakukan pada waktu 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 105, dan 120 menit (Hidayari dkk, 2016).

Tabel 1. Absorbansi Methylen Blue

Waktu (menit)	Absorbansi
0	0,744
5	0,733
10	0,712
15	0,706
30	0,688
45	0,680
60	0,668
90	0,660
105	0,654
120	0,654

Nilai absorbansi awal saat KA-ActLKM dimasukkan lebih tinggi dibanding menit ke-120, menunjukkan penurunan konsentrasi *Methylene Blue* akibat proses adsorpsi. Semakin rendah nilai absorbansi, maka semakin sedikit zat warna yang tersisa, karena absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi (Neldawati, 2013). Penelitian ini menggunakan larutan standar *Methylene Blue* dengan konsentrasi 0, 25, 50, 75, dan 100 ppm pada panjang gelombang 663 nm. Hasil kurva standar ditampilkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Kurva Standar Methylen Blue

3.3 Evaluasi Efektivitas KA-ActKLM terhadap Adsorpsi *Methylene Blue*

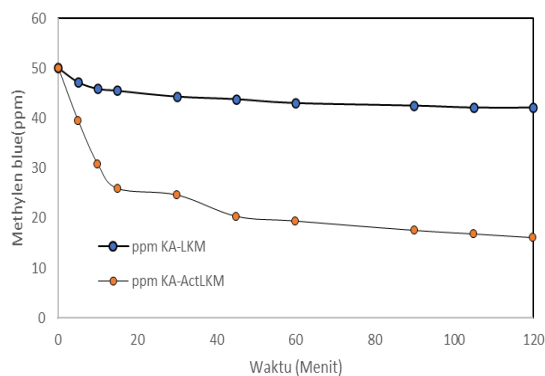
Pengolahan limbah *Methylene Blue* menggunakan Karbon aktif dari kulit manggis

menunjukkan efektivitas dalam menurunkan konsentrasi zat warna. Karbon aktif yang digunakan berukuran 20 sampai 40 mesh sebanyak 50 mg, dengan waktu kontak selama 120 menit. Penurunan konsentrasi terjadi karena molekul *Methylene Blue* teradsorpsi pada permukaan Karbon aktif. Data penurunan konsentrasi selama proses berlangsung disajikan pada Gambar 3.5 dan Table 2.

Tabel 2. Persentase Removal Methylen Blue

KA-LKM				KA-ActLKM			
Waktu	Absorban si	ppm	% Removal	Waktu	Absorban si	ppm	% Removal
0	0,744	50,000	0%	0	0,744	50,000	0%
5	0,733	47,178	6%	5	0,586	39,424	21%
10	0,712	45,825	8%	10	0,456	30,652	39%
15	0,706	45,439	9%	15	0,385	25,872	48%
30	0,688	44,279	11%	30	0,366	24,581	51%
45	0,680	43,764	12%	45	0,302	20,295	59%
60	0,668	42,991	14%	60	0,288	19,332	61%
90	0,660	42,475	15%	90	0,260	17,475	65%
105	0,654	42,089	16%	105	0,249	16,741	67%
120	0,654	42,089	16%	120	0,238	16,000	68%

KA-ActLKM mampu menurunkan konsentrasi methylen blue sebanyak 68% dari 50 ppm menjadi 16 ppm. Sedangkan menggunakan KA-LKM hanya mampu menurunkan dari 50 ppm menjadi 42 ppm. Penyebab KA-ActLKM mampu mengadsorpsi dengan optimal karena proses pra-oksidasi menggunakan H_2O_2 mampu mengubahnya menjadi material hidrofilik dengan sudut kontak $55,83^\circ$, sehingga *methylen blue* yang terdapat pada air dapat terserap dengan baik. *Methylene Blue* merupakan kationik yang memiliki kecenderungan mudah teradsorpsi pada permukaan adsorben yang bermuatan negatif serta bersifat hidrofilik (Alharby et al., 2021). Proses oksidasi dengan H_2O_2 meningkatkan gugus fungsi oksigen pada KA-ActLKM sehingga meningkatkan interaksi elektrostatis dan ikatan hidrogen antara permukaan karbon dan molekul *Methylene Blue* (yang bermuatan positif), sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi (Ariyanto et al., 2019).



Gambar 3.5. Grafik Penurunan konsentrasi Methylene Blue dengan KA-LKM dan KA-ActLKM

Gambar 3.5 Menunjukkan bahwa pada waktu awal kontak antara adsorben dan MB sangat cepat dikarenakan terdapat situs aktif yang tersedia pada MB sampai menit ke 20. Selanjutnya mengalami penurunan melambat hingga mencapai kesetimbangan sekitar 120 menit. Hal ini terjadi karena semakin sedikit situs aktif pada KA-ActLKM dan KA-LKM yang tersisa dan munculnya gaya tolak-menolak antar molekul MB (Khaki et al., 2021).

3.4 Evaluasi Kinetika Adsorpsi *Methylene Blue* Menggunakan KA-ActLKM

Pemodelan kinetika adsorpsi *Methylene Blue* menggunakan karbon aktif dari limbah kulit manggis (KA-LKM) dan karbon aktif teraktivasi hidrogen peroksida (KA-ActLKM) mengikuti pendekatan pseudo second-order. Hasil fitting menunjukkan bahwa model pseudo second-order memberikan koefisien determinasi (R^2) yang tinggi baik untuk KA-LKM ($R^2 = 0,988$) maupun KA-ActLKM ($R^2 = 0,988$), yang mengindikasikan kesesuaian model dalam menggambarkan perilaku adsorpsi. Nilai kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) KA-LKM adalah sebesar 42,32 mg/g dengan konstanta laju adsorpsi (k_2) sebesar 0,00199 g/mg·menit. Sementara itu, KA-ActLKM menunjukkan kapasitas adsorpsi yang jauh lebih tinggi sebesar 180,51 mg/g, meskipun nilai konstanta laju k_2 lebih rendah, yaitu 0,000575 g/mg·menit.

Temuan ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara kimisorpsi, dengan peningkatan signifikan pada kapasitas adsorpsi akibat proses aktivasi menggunakan H_2O_2 . Aktivasi tersebut diduga meningkatkan jumlah situs aktif, luas permukaan, dan polaritas

permukaan karbon aktif, sehingga secara efektif meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap *Methylene Blue*. Dengan demikian, KA-ActLKM menunjukkan potensi yang lebih unggul sebagai adsorben dalam aplikasi pengolahan air yang terkontaminasi zat warna.

Tabel 3. Analisis Kinetika Adsorpsi *Methylene Blue* Menggunakan Model Pseudo Second-Order

Parameter	KA-LKM	KA-ActLKM
Kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) (mg/g)	42,32	180,51
K_2 (g/mg·menit)	0,00199	0,000575
Koefisien determinasi R^2	0,988	0,988

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan hasil karakterisasi terhadap KA-ActLKM, proses aktivasi menggunakan H_2O_2 terbukti mampu meningkatkan luas permukaan spesifik karbon aktif dari 522 m^2/g menjadi 700 m^2/g , memperkaya gugus fungsi oksigen seperti hidroksil dan karbonil pada permukaannya
2. Berdasarkan hasil karakterisasi terhadap KA-ActLKM, proses aktivasi dengan H_2O_2 menyebabkan penurunan sudut kontak dari 134,01° menjadi 55,83°, yang menunjukkan peningkatan sifat hidrofilik permukaan karbon secara signifikan.
3. Berdasarkan hasil evaluasi efektivitas adsorpsi, proses adsorpsi menunjukkan efisiensi penurunan konsentrasi *Methylene Blue* (MB) hingga 68% menggunakan karbon aktif teraktivasi (KA-ActLKM), jauh lebih tinggi dibandingkan karbon aktif tanpa aktivasi (16%). Analisis kinetika menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengikuti model pseudo orde dua (*pseudo second-order*), dengan hasil *fitting* yang memberikan nilai koefisien determinasi (R^2) tinggi, yaitu 0,988 untuk KA-LKM dan 0,988 untuk KA-ActLKM, yang mengindikasikan kesesuaian model yang sangat baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dapat mencantumkan ucapan terima kasih kepada sponsor atau pihak-pihak yang membantu dalam penelitian dibagian ini. Lab

Kimia Dasar Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang membantu proses adsorpsi menggunakan Uv-Vis. Lab Universitas Gadjah Mada yang membantu proses analisa SEM, AAS, dan sudut kontak, Sekolah Tinggi Teknologi Fatahillah Cilegon yang telah membantu proses preparasi, dan Politeknik Industri Petrokimia Banten yang telah membantu proses pengolahan data dan penulisan jurnal.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Ghouti, M. A., & Al-Absi, R. S. (2020). Mechanistic understanding of the adsorption and thermodynamic aspects of cationic *Methylene Blue* dye onto cellulosic olive stones biomass from wastewater. *Scientific Reports*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72996-3>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Alharby, N. F., Almutairi, R. S., & Mohamed, N. A. (2021). Adsorption behavior of *Methylene Blue* dye by novel crosslinked o-cm-chitosan hydrogel in aqueous solution: Kinetics, isotherm and thermodynamics. *Polymers*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/polym13213659>
- Aritonang, A. B., Selpiana, H., Wibowo, M. A., Warsidah, W., & Adhitiawarman, A. (2022). Photocatalytic Degradation of *Methylene Blue* using Fe₂O₃-TiO₂/Kaolinite under Visible Light Illumination. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, 7(3), 277. <https://doi.org/10.20961/jkpk.v7i3.66567>
- Ariyanto, T., Sarwendah, R. A. G., Amimmal, Y. M. N., Laksmiana, W. T., & Prasetyo, I. (2019). Modifying nanoporous carbon through hydrogen peroxide oxidation for removal of metronidazole antibiotics from simulated wastewater. *Processes*, 7(11), 1–9. <https://doi.org/10.3390/pr7110835>
- Beyan, S. M., Prabhu, S. V., Sissay, T. T., & Getahun, A. A. (2021). Sugarcane bagasse based activated carbon preparation and its adsorption efficacy on removal of BOD and COD from textile effluents: RSM based modeling, optimization and kinetic aspects. *Bioresource Technology Reports*, 14(November 2020), 100664. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100664>
- Haleem, A., Shafiq, A., Chen, S. Q., & Nazar, M. (2023). A Comprehensive Review on Adsorption, Photocatalytic and Chemical Degradation of Dyes and Nitro-Compounds over Different Kinds of Porous and Composite Materials. *Molecules*, 28(3). <https://doi.org/10.3390/molecules28031081>
- Hasnaoui, A., Chikhi, M., Balaska, F., Seraghni, W., Boussemghoune, M., & Dizge, N. (2024). Electrocoagulation employing recycled aluminum electrodes for *Methylene Blue* remediation. *Desalination and Water Treatment*, 319(April), 100453. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100453>
- Hassaan, M. A., & Nemr, A. El. (2017). Advanced Oxidation Processes for Textile Wastewater Treatment. *International Journal of Photochemistry and Photobiology*, 2(3), 85–93. <https://doi.org/10.11648/j.ijpp.20170203.13>
- Ihaddaden, S., Aberkane, D., Boukerroui, A., & Robert, D. (2022). Removal of *Methylene Blue* (basic dye) by coagulation-flocculation with biomaterials (bentonite and *Opuntia ficus indica*). *Journal of Water Process Engineering*, 49(March), 102952. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102952>
- Katheresan, V., Kansedo, J., & Lau, S. Y. (2018). Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(4), 4676–4697. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060>
- Khajonrit, J., Sichumsaeng, T., Kalawa, O., Chaisit, S., Chinnakorn, A., Chanlek, N., & Maensiri, S. (2022). Mangosteen peel-derived activated carbon for supercapacitors. *Progress in Natural Science: Materials International*, 32(5), 570–578. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.09.004>

- Khaki, E., Abyar, H., Nowrouzi, M., Younesi, H., Abdollahi, M., & Enderati, M. G. (2021). Comparative life cycle assessment of polymeric membranes: Polyacrylonitrile, polyvinylimidazole and poly (acrylonitrile-co-vinylimidazole) applied for CO₂ sequestration. *Environmental Technology and Innovation*, 22, 101507. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101507>
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., & Khan, I. (2022). Review on *Methylene Blue*: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020242>
- Khoshnood Motlagh, E., Asasian-Kolur, N., Sharifian, S., & Ebrahimian Pirbazari, A. (2021). Sustainable rice straw conversion into activated carbon and nano-silica using carbonization-extraction process. *Biomass and Bioenergy*, 144(December 2020), 105917. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105917>
- Kusuma, H. S., Christa Jaya, D. E., Illiyanasafa, N., Ikawati, K. L., Kurniasari, E., Darmokoesoemo, H., & Amenaghawon, A. N. (2024). A critical review and bibliometric analysis of *Methylene Blue* adsorption using leaves. *Chemosphere*, 356(September 2023), 141867. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141867>
- Liepins, K., Volperts, A., Dobeles, G., Plavniece, A., Bikovens, O., Sansonetti, E., & Zhurinsk, A. (2024). Enhancing the Wetting Properties of Activated Biochar by Oxidation with Hydrogen Peroxide. *Chemistry (Switzerland)*, 6(5), 911–921. <https://doi.org/10.3390/chemistry6050053>
- López-Luna, J., Ramírez-Montes, L. E., Martínez-Vargas, S., Martínez, A. I., Mijangos-Ricardez, O. F., González-Chávez, M. del C. A., Carrillo-González, R., Solís-Domínguez, F. A., Cuevas-Díaz, M. del C., & Vázquez-Hipólito, V. (2019). Linear and nonlinear kinetic and isotherm adsorption models for arsenic removal by manganese ferrite nanoparticles. *SN Applied Sciences*, 1(8), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0977-3>
- Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J., Umar, M., Abdulhamid, Z., & Muhammad, A. (2022). Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. *Caliphate Journal of Science and Technology*, 4(1), 20–26. <https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
- Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1(October), 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
- Rigoletto, M., Laurenti, E., & Tummino, M. L. (2024). An Overview of Environmental Catalysis Mediated by Hydrogen Peroxide. *Catalysts*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/catal14040267>
- Soffian, M. S., Abdul Halim, F. Z., Aziz, F., A. Rahman, M., Mohamed Amin, M. A., & Awang Chee, D. N. (2022). Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment. *Environmental Advances*, 9(March), 100259. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100259>
- SUHIRMAN, S.-. (2023). Uji Kemampuan Partikel KMnO₄ Teremban Dalam Karbon Aktif Tempurung Kelapa Sawit Terhadap H₂S Dalam Reaktor Biogas Unggun Tetap. *Unistek*, 10(2), 134–143. <https://doi.org/10.33592/unistek.v10i2.3806>
- Suhirman, S., Ariyanto, T., & Prasetyo, I. (2021). Preparation of magnesium oxide confined in activated carbon synthesized from palm kernel shell and its application for hydrogen sulfide removal. *Key Engineering Materials*, 884(1), 77–82. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/963/1/012031>
- Sujiono, E. H., Zabrian, D., Zurnansyah, Mulyati, Zharvan, V., Samnur, & Humairah, N. A. (2022). Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry*, 4(November 2021), 100291. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>
- Tolkou, A. K., Maroulas, K. N., Theologis, D., Katsoyiannis, I. A., & Kyzas, G. Z.

- (2024). Comparison of Modified Peels: Natural Peels or Peels-Based Activated Carbons for the Removal of Several Pollutants Found in Wastewaters. *C-Journal of Carbon Research*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/c10010022>
- Vatanpour, V., Paziresh, S., Dehqan, A., Asadzadeh-Khaneghah, S., & Habibi-Yangjeh, A. (2021). Hydrogen peroxide treated g-C₃N₄ as an effective hydrophilic nanosheet for modification of polyethersulfone membranes with enhanced permeability and antifouling characteristics. *Chemosphere*, 279, 130616. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130616>
- Yaseen, D. A., & Scholz, M. (2019). Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. In *International Journal of Environmental Science and Technology* (Vol. 16, Issue 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2130-z>
- Yuvanatemiya, V., Srean, P., Klangbud, W. K., Venkatachalam, K., Wongs, J., Parametthanuwat, T., & Charoenphun, N. (2022). A Review of the Influence of Various Extraction Techniques and the Biological Effects of the Xanthones from Mangosteen (*Garcinia mangostana* L.) Pericarps. *Molecules*, 27(24). <https://doi.org/10.3390/molecules27248775>
- Zhang, Y., Zheng, Y., Yang, Y., Huang, J., Zimmerman, A. R., Chen, H., Hu, X., & Gao, B. (2021). Mechanisms and adsorption capacities of hydrogen peroxide modified ball milled biochar for the removal of *Methylene Blue* from aqueous solutions. *Bioresource Technology*, 337(June), 125432. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125432>
- Zhu, W., Wu, Z., Zhao, S., Lv, F., Zhang, Y., & Guo, S. (2023). Selective adsorption and separation of *Methylene Blue* from wastewater by self-standing polyvinylpyrrolidone and SiO₂ electrospun membranes. *Chemical Engineering Science*, 280(June), 119009. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119009>