

# Sintesis Bioadsorben Kristal Violet Berbasis Selulosa dari Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Aktivasi Menggunakan Pemanasan Microwave

Hilmi Rafif ardy, Sandy Aulia Treeana, Sintha Soraya Santi\*, Renova Panjaitan

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: sintha.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 29 Juni 2026

Disetujui: 3 Juli 2026

## Abstract

This study aims to synthesize a cellulose-based bioadsorbent derived from oil palm empty fruit bunches (OPEFB) through microwave-assisted activation for crystal violet dye adsorption applications. OPEFB was selected due to its high lignocellulosic content and its underutilized potential, making it a promising raw material for environmentally friendly and economically valuable activated carbon. The research procedure included delignification using 12% NaOH solution, carbonization at 500°C for 2 hours, and microwave activation with varying power levels (400–800 W) and activation times (4–16 minutes). The produced activated carbon was characterized through moisture content, ash content, crystal violet adsorption efficiency using UV-Vis spectrophotometry, and surface morphology analysis using SEM. The results showed that delignification increased cellulose content from 37.12% to 40.53% while reducing lignin content from 23.41% to 2.55%, thereby improving the suitability of OPEFB as a bioadsorbent precursor. Increasing microwave power and activation time reduced moisture content to a minimum of 4.56%, whereas ash content increased due to the formation of mineral residues during heating. All samples met the quality standards of SNI 06-3730-1995. Crystal violet adsorption efficiency improved with increasing microwave power and reached an optimum condition at 600 W for 10 minutes; however, excessive power led to a decline in adsorption performance, likely due to structural damage of the carbon pores.

**Keywords:** *bioadsorbent, OPEFB, activated carbon, microwave activation, crystal violet*

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis bioadsorben berbasis selulosa dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui aktivasi menggunakan pemanasan microwave untuk aplikasi adsorpsi zat warna kristal violet. TKKS dipilih karena memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi serta pemanfaatannya yang masih terbatas, sehingga berpotensi dikembangkan menjadi material karbon aktif yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomis. Tahapan penelitian meliputi delignifikasi menggunakan larutan NaOH 12%, karbonisasi pada suhu 500°C selama 2 jam, serta aktivasi microwave dengan variasi daya 400–800 watt dan waktu 4–16 menit. Karbon aktif yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi melalui uji kadar air, kadar abu, efisiensi adsorpsi menggunakan spektrofotometer UV-Vis, serta analisis morfologi permukaan menggunakan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses delignifikasi mampu meningkatkan kadar selulosa dari 37,12% menjadi 40,53% serta menurunkan kadar lignin dari 23,41% menjadi 2,55%, sehingga meningkatkan potensi TKKS sebagai bahan baku bioadsorben. Peningkatan daya dan waktu aktivasi microwave menurunkan kadar air hingga nilai terendah 4,56%, sementara kadar abu meningkat seiring bertambahnya intensitas pemanasan akibat pembentukan residu mineral. Seluruh sampel tetap memenuhi standar mutu SNI 06-3730-1995. Efisiensi adsorpsi kristal violet meningkat seiring kenaikan daya aktivasi dan mencapai kondisi optimum pada 600 watt selama 10 menit, namun mengalami penurunan pada kondisi daya yang lebih tinggi akibat kemungkinan kerusakan struktur pori karbon aktif.

**Kata Kunci:** *bioadsorben, TKKS, karbon aktif, aktivasi microwave, kristal violet*

## 1. Pendahuluan

Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan salah satu jenis limbah dengan jumlah produksi yang sangat tinggi di Indonesia. Limbah TKKS berasal dari Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan berbagai limbah padat, seperti tandan kosong kelapa sawit, cangkang, serta serat mesokarp [1]. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, produksi tanaman kelapa sawit di Indonesia mencapai 46.9610,10 ribu ton, dengan kontribusi pada perekonomian Indonesia mencapai 96,86% dari total ekspor pertanian, yang dimana 73,83%-nya adalah dari kelapa sawit [2]. TKKS, yang merupakan limbah dari

kelapa sawit, masih belum dimanfaatkan secara optimal meskipun ketersediaannya sangat melimpah dalam sektor pertanian. Pemanfaatan limbah TKKS yang telah dilakukan diantaranya menjadi pengolahan produk biochar, bio – oil [3] dan pupuk kompos [1]. Sehingga, peluang pemanfaatan dalam limbah TKKS masih cukup besar, salah satunya sebagai karbon aktif.

Tandan Kosong Kelapa Sawit mengandung senyawa lignoselulosa yang terdiri atas selulosa, hemiselulosa dan lignin dengan persentase masing-masing sebesar 45,95%, 16,49% dan 22,84% [4]. Adanya Kandungan lignoselulosa yang relatif tinggi pada TKKS menjadikannya berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan karbon aktif. Karbon aktif dari TKKS diaktivasi menggunakan pemanasan furnace pada suhu 700°C dengan waktu aktivasi selama 30 menit dan bantuan media 60% CO<sub>2</sub> didapatkan yield pada karbon aktif sebesar 36,18% [5]. Namun, penggunaan furnace untuk melakukan aktivasi merupakan metode yang konvensional sehingga energi yang dibutuhkan lebih besar [6]. Penggunaan karbon aktif salah satunya sebagai adsorben karena permukaan areanya yang luas dan tingkat mikroporositasnya besar membuatnya mampu untuk melakukan adsorpsi terhadap berbagai polutan [7].

Limbah zat warna dari industri tekstil merupakan salah satu polutan yang paling banyak ditemukan serta memiliki dampak berbahaya bagi lingkungan. Pewarnaan adalah proses yang menghasilkan zat warna yang larut dalam air. Zat warna ini tidak biodegradable karena memiliki struktur molekul aromatik yang kompleks sehingga bersifat stabil dan sulit terurai secara biologis [8]. Salah satu limbah zat warna yang dihasilkan oleh industri tekstil yaitu pewarna kristal violet. Pewarna kristal violet dapat mengiritasi kulit dan saluran pencernaan ketika diserap melalui kulit dalam jumlah berbahaya. Sensitivitas cahaya yang menyakitkan dan ketidaknyamanan ringan pada mata dapat terjadi akibat paparan pewarna. Dalam situasi parah, hal ini dapat menyebabkan gagal ginjal, komplikasi pernapasan, dan kebutaan yang tidak dapat dipulihkan [9]. Sehingga, dilakukan adsorpsi menggunakan karbon aktif sebagai upaya untuk menurunkan kandungan limbah zat warna kristal violet di lingkungan.

Proses aktivasi karbon aktif dapat dilakukan menggunakan metode kimia dan fisika. Namun, metode kimia memerlukan waktu yang lama, menggunakan bahan kimia yang mahal dan berbahaya bagi lingkungan, serta menghasilkan limbah yang sulit diolah [10]. Oleh karena itu, metode aktivasi fisika dipandang sebagai alternatif yang lebih prospektif dalam pembuatan karbon aktif. Aktivasi fisika dapat dilakukan dengan cara menggunakan alat termal, seperti pemanasan konvensional salah satunya furnace yang perlu dioperasikan dalam suhu tinggi (700 – 900 °C) mengakibatkan konsumsi energi yang tinggi, sehingga diperlukan proses aktivasi yang lebih efisien dan memerlukan konsumsi energi yang lebih rendah. Penggunaan microwave menjadi salah satu alternatif alat termal yang dapat dijadikan sebagai potensial untuk proses aktivasi yang lebih efisien dan hemat energi [11].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Biti et al pada tahun 2024 tentang pembuatan karbon aktif dari bahan microcrystalline cellulose dengan aktivasi menggunakan pemanasan microwave. Pada penelitian tersebut proses aktivasi yang dilakukan dengan pemanasan microwave dioperasikan pada suhu yang lebih rendah daripada pemanasan menggunakan metode konvensional, dengan waktu proses aktivasi yang terjadi 83-94% lebih singkat dan 39-68% konsumsi energi pemanasan lebih rendah. Namun, bahan yang digunakan berupa produk yang sudah siap pakai, sehingga perlu diteliti lebih lanjut mengenai karbon aktif berbasis selulosa yang berasal dari ekstrak bahan organik seperti TKKS [12].

Sejauh ini, proses pembuatan bioadsorben berbasis selulosa menggunakan bahan dasar dari TKKS dan dengan aktivasi menggunakan microwave masih terbatas. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mendalam mengenai sintesis bioadsorben kristal violet berbasis selulosa dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan aktivasi menggunakan pemanasan microwave.

## **2. Metode Penelitian**

### *Pelaksanaan Penelitian*

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Riset Prodi Teknik Kimia, Fakultas Teknik dan Sains Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur.

### *Bahan dan Alat*

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang didapatkan dari Kalimantan Tengah Kabupaten Kotawaringin Timur Cempaga Hulu, Natrium Hidroksida (NaOH) 12%, Aquadest, dan Kristal Violet. Alat yang digunakan yaitu beaker glass 500 ml, gelas ukur 50 ml; dan 1000 ml, pipet tetes, corong kaca 75 mm, labu ukur 100 ml, kertas saring, magnetic stirrer, termometer, oven, grinder, batang pengaduk, furnace, serta pH meter.

### Tahapan Pelaksanaan Kegiatan

Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dipotong dengan panjang 3-5 cm untuk memudahkan proses penggilingan, sehingga dapat meningkatkan efektivitas proses grinder dan mempercepat proses delignifikasi. Setelah itu, serat yang telah dipotong dicuci menggunakan aquadest hingga bersih, kemudian dikeringkan. Dalam penelitian ini, Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) melalui proses delignifikasi menggunakan larutan NaOH 12% sebanyak 100 mL untuk mengurangi kandungan lignin dan meningkatkan kualitasnya sebagai bahan bioadsorben. Proses delignifikasi dilakukan dengan pemanasan pada suhu 90°C selama 2 jam. Proses ini bertujuan untuk melarutkan lignin dan meningkatkan ketersediaan senyawa yang dapat berfungsi sebagai bioadsorben. Sebelum dilakukan pencucian, serabut TKKS bersama larutan delignifikasi didiamkan selama 24 jam hingga mencapai suhu ruang.

Selanjutnya, serabut TKKS dipisahkan dari cairan lindi hitam dan dilakukan proses pencucian hingga pH serabut mencapai kondisi netral. Pengukuran pH dilakukan menggunakan kertas indikator pH. Selama proses pencucian dan pembilasan, sisa NaOH yang masih melekat pada serabut TKKS akan larut dan terbuang sehingga pH serabut TKKS menjadi netral. Setelah mencapai pH netral, serabut TKKS ditimbang dan kemudian dikeringkan pada suhu 100 °C hingga diperoleh massa konstan. Setelah itu, serabut TKKS yang telah melalui proses delignifikasi digunakan untuk tahap selanjutnya, yaitu pemrosesan karbonisasi menggunakan furnace bertujuan untuk meningkatkan karakteristik material yang dihasilkan sebagai bioadsorben.

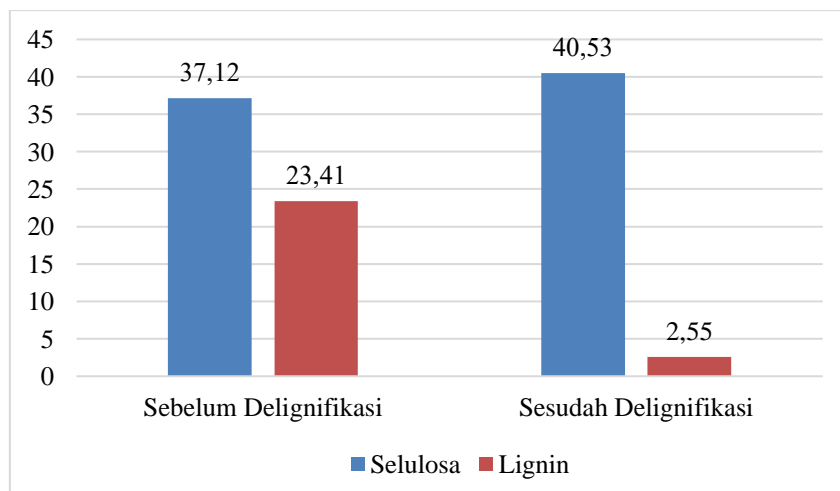
Proses pembuatan pupuk organik Karbonisasi adalah proses pemecahan termal TKKS, yang dilakukan dengan alat furnace pada suhu 500°C dalam kondisi tanpa oksigen menggunakan wadah tertutup selama 2 jam. Tahapan aktivasi awal dilakukan dengan Proses aktivasi menggunakan pemanasan microwave dilakukan dengan memanaskan biochar yang telah dihasilkan dari proses pirolisis menggunakan microwave dengan daya dan waktu yang divariasikan, seperti 400 W; 500 W; 600 W; 700 W; dan 800 W, serta durasi 4; 7; 10; 13; dan 16 menit, untuk membuka pori-pori dan meningkatkan luas permukaan karbon.

Percobaan batch dilakukan setelah proses aktivasi dengan menyiapkan 50 ml larutan kristal violet dengan konsentrasi 100 ppm dan ditambahkan 0,5 gram bioadsorben TKKS dimasukkan ke dalam beaker glass. Sampel lalu diaduk menggunakan magnetic stirrer pada kecepatan 300 rpm selama 1 jam. Setelah itu menganalisis sampel menggunakan spektrometer Uv-Vis pada panjang gelombang 590 nm. Pada Penelitian ini menggunakan analisis data berupa Analisis Bahan Tandan Kosong Kelapa Sawit untuk dianalisa kadungan selulosa agar mengetahui kandungan sebelum dan sesudah di delignifikasi dalam TKKS, Analisis Spektrofotometer Uv-Vis untuk mengetahui daya serat karbon terhadap TKKS menggunakan UV-vis, Analisis proksimat berupa kadar air dan kadar abu.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### Analisa Bahan Baku

Hasil analisis kandungan bahan baku Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang dilakukan menggunakan metode analisis Chesson Datta.



**Gambar 1:** Grafik Analisa Perbandingan Bahan Baku Sebelum dan Sesudah Delignifikasi

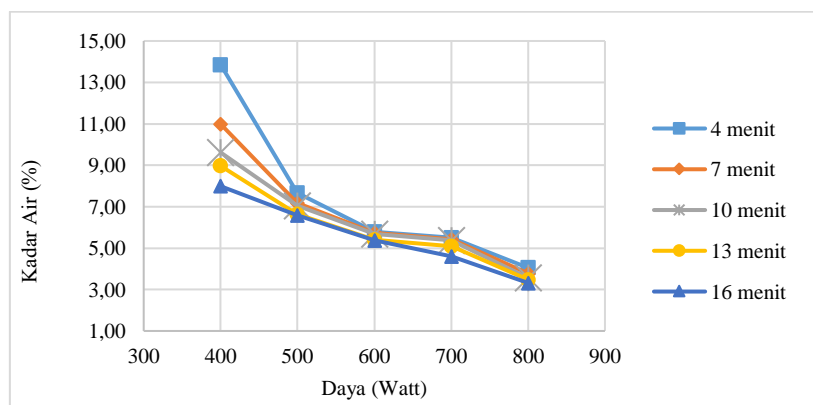
Berdasarkan **Gambar 1** tersebut, hasil analisis komposisi kimia Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) sebelum dan sesudah proses delignifikasi menunjukkan adanya perubahan yang signifikan pada

komposisi bahan. Sebelum perlakuan, kandungan selulosa sebesar 37,12% dan lignin sebesar 23,41%. Setelah dilakukan proses delignifikasi, kandungan selulosa meningkat menjadi 40,53%, sedangkan lignin menurun drastis menjadi 2,55%. Perubahan komposisi ini menunjukkan bahwa proses delignifikasi mampu menurunkan fraksi lignin secara signifikan sehingga selulosa menjadi lebih dominan dalam struktur biomassa.

Proses delignifikasi TKKS menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 12% terbukti efektif menurunkan kadar lignin dari 26,49% menjadi 20,84% serta menaikkan kadar selulosa dari 32,57% menjadi 66,46%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan NaOH pada konsentrasi 12% mampu merusak dan melarutkan struktur lignin yang mengikat selulosa [13]. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian ini, kandungan lignin akhir mencapai 2,55%, yang lebih rendah dibanding literatur, menandakan bahwa proses delignifikasi yang dilakukan telah berjalan sangat efektif dalam menghilangkan lignin. Peningkatan persentase selulosa terjadi akibat berkurangnya fraksi lignin, bukan karena pembentukan selulosa baru. Menurunnya lignin, selulosa menjadi lebih dominan dan lebih mudah diakses dalam biomassa TKKS. Secara keseluruhan, proses delignifikasi mampu meningkatkan kualitas TKKS sebagai bahan baku berbasis selulosa, sehingga lebih potensial digunakan pada proses lanjutan seperti bioetanol, bioadsorben, atau produk berbasis selulosa lainnya [14].

#### *Pengaruh Daya Dan Waktu Terhadap Kadar Air*

Pengujian kadar air dilakukan dengan menimbang sampel sebanyak 1 g, kemudian dimasukkan ke dalam botol vial tanpa penutup dan dipanaskan dalam oven pada suhu 120 °C selama 3 jam. Setelah itu, sampel didinginkan di dalam desikator hingga suhu ruang, lalu ditimbang kembali. Persentase kadar air dihitung dengan  $W_0$  sebagai kehilangan bobot sampel setelah pemanasan dikurangi dengan  $W_1$  sebagai bobot sampel sebelum pemanasan dalam satuan gram dan dibagi  $W_0$  dan dikali 100.



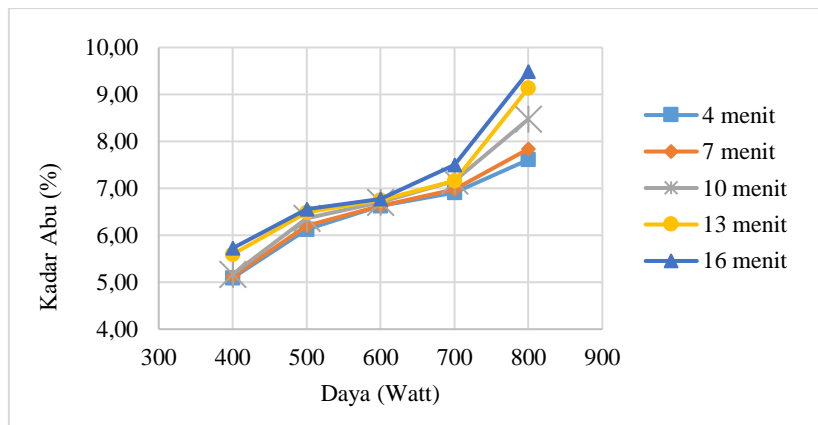
**Gambar 2:** Grafik Pengujian Kadar Air Karbon Aktif

Berdasarkan hasil pengujian kadar air yang terdapat pada gambar 2, kadar air karbon aktif yang dihasilkan menunjukkan penurunan yang signifikan seiring dengan meningkatnya daya dan waktu aktivasi. Pada percobaan dengan daya 400W selama 4 menit, kadar air tercatat 13,89%, dan pada daya 800W selama 10 menit, kadar air menurun menjadi 4,56%. Penurunan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi daya dan waktu aktivasi, semakin efektif proses pemanasan dalam mengurangi kandungan air pada karbon aktif. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Oktavia tahun 2024, yang juga menemukan penurunan kadar air pada karbon aktif seiring dengan peningkatan daya dan waktu aktivasi. Dalam penelitiannya, pada daya 500W selama 5 menit kadar air tercatat 10,33%, dan pada daya 900W selama 15 menit, kadar air menurun menjadi 7,00% [15]. Penurunan kadar air yang terjadi pada kedua penelitian ini menunjukkan bahwa karbon aktif yang dihasilkan dengan daya dan waktu aktivasi yang lebih tinggi memiliki kadar air yang lebih rendah, yang meningkatkan efisiensinya dalam aplikasi penyaringan dan adsorpsi. Hal ini juga memastikan bahwa karbon aktif yang dihasilkan untuk semua perlakuan sesuai dengan standar kualitas SNI 06-3730-1995 yang menetapkan kadar air yang rendah.

#### *Pengaruh Daya dan Waktu Terhadap Kadar Abu*

Pengujian kadar abu dilakukan dengan menimbang sampel sebanyak 2 g yang kemudian ditempatkan dalam cawan porselen tanpa penutup. Sampel selanjutnya ditanur di dalam furnace pada suhu 900 °C selama 2 jam. Perhitungan kadar abu dilakukan dengan  $W_2$  sebagai bobot akhir sampel sebelum

pemanasan dibagi dengan W3 sebagai bobot awal sampel setelah proses penanuran, yang dinyatakan dalam satuan gram dan dikali 100.



**Gambar 3:** Grafik Pengujian Kadar Abu Karbon Aktif

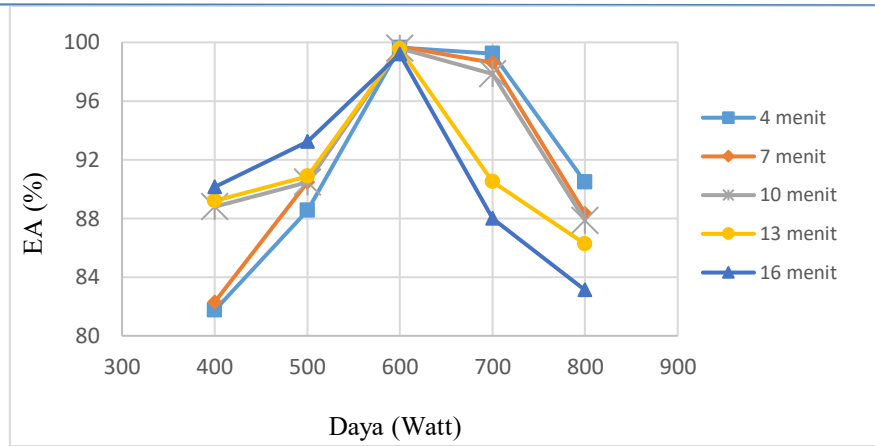
Berdasarkan hasil pengujian kadar abu pada Tabel gambar 3, kadar abu karbon aktif pada waktu aktivasi 10 menit menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya daya. Pada daya 400 W, kadar abu tercatat sebesar 5,24%. Peningkatan daya menjadi 500 W menghasilkan kadar abu 6,28%, sedangkan pada daya 600 W, kadar abu menurun menjadi 6,78%, kemungkinan akibat perubahan distribusi pori dan penetrasi uap air ke dalam struktur karbon. Pada daya 700 W, kadar abu meningkat kembali menjadi 7,16%, dan pada daya 800 W, kadar abu tercatat 9,14%, menunjukkan bahwa daya yang lebih tinggi cenderung meningkatkan pembentukan oksida logam selama proses aktivasi. Seluruh nilai tetap berada di bawah batas maksimum SNI 06-3730-1995 sebesar 10%, sehingga kualitas karbon aktif masih memenuhi standar.

Kadar abu dapat dijadikan indikator kualitas karbon aktif. Nilai tinggi menunjukkan kemampuan adsorpsi menurun karena pori-pori tertutup mineral sisa pembakaran, sedangkan nilai rendah menandakan karbon lebih murni dan efektif untuk adsorpsi [1]. Hasil ini sejalan dengan penelitian Oktavia tahun 2024, yang menunjukkan pola yang serupa. Pada daya 500W dengan waktu aktivasi 5 menit, kadar abu tercatat 5,33%, dan pada daya 900W dengan waktu aktivasi 15 menit, kadar abu meningkat menjadi 6,67% [15]. Pola ini memperlihatkan bahwa semakin besar daya dan lama aktivasi, semakin banyak oksida logam terbentuk, sehingga kadar abu meningkat.

#### *Pengaruh Daya Dan Waktu Terhadap Efisiensi Penyerapan Adsorbansi Kristal Violet*

Hasil pengujian adsorbansi Kristal Violet menggunakan spektrometer UV-Vis yang dilakukan di Laboratorium Biologi Universitas Negeri Surabaya (UNESA). Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu, yang memberikan informasi tentang kandungan dan sifat bahan yang diuji. Pengujian spesifikasi karbon aktif bertujuan untuk mengetahui daya serat karbon terhadap TKKS menggunakan UV-vis menggunakan rumus kapasitas adsorpsi (Q) dinyatakan sebagai persamaan (1) dan efisiensi adsorpsi (EA) sebagai persamaan (2), dengan V merupakan Volume larutan kristal Violet (L), Ca merupakan Konsentrasi awal kristal violet (mg/L), Cb merupakan Konsentrasi akhir setelah proses adsorpsi (mg/L), Fp merupakan Faktor pengenceran dan W merupakan Bobot karbon aktif (g).

Berdasarkan **Gambar 4**, dapat diamati bahwa peningkatan daya microwave berpengaruh signifikan terhadap efisiensi adsorpsi pada setiap variasi waktu kontak. Pada waktu kontak 4 menit, efisiensi adsorpsi menunjukkan peningkatan yang signifikan dari daya 400 W hingga mencapai nilai maksimum pada sekitar 600 W, kemudian terjadi penurunan efisiensi seiring dengan meningkatnya daya menjadi 700 W dan 800 W. Pola serupa juga terlihat pada waktu kontak 7 menit, di mana efisiensi adsorpsi meningkat dari daya 400 W dan mencapai puncaknya pada sekitar 600 W, lalu sedikit menurun ketika daya dinaikkan lebih lanjut. Pada waktu 10 menit, efisiensi adsorpsi relatif stabil dan cukup tinggi pada rentang daya antara 500 W hingga 600 W, namun mulai menurun pada daya 700 W dan 800 W. Pada waktu 13 menit, efisiensi adsorpsi juga menunjukkan peningkatan dari daya 400 W ke 500 W, mencapai puncaknya pada sekitar 600 W, namun kemudian kembali menurun saat daya meningkat hingga 800 W. Pola yang hampir sama juga terlihat pada waktu 16 menit, di mana efisiensi adsorpsi meningkat dari daya 400 W hingga 600 W, tetapi mulai menurun pada daya yang lebih tinggi.



Gambar 4: Grafik Efisiensi Adsorpsi Kristal Violet

$$Q \left( \frac{mg}{g} \right) = \frac{V (Ca - Cb) F_p}{W} \dots\dots\dots(1)$$

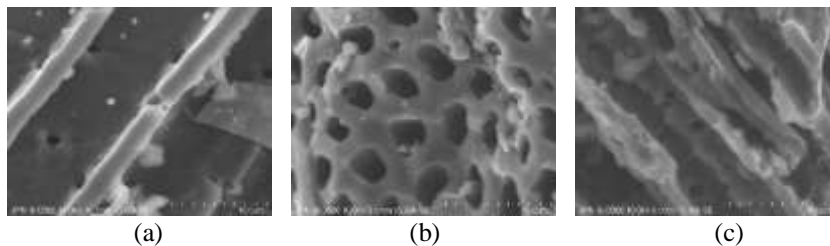
$$EA(\%) = \frac{(Ca - Cb)}{Ca} \times 100 \dots\dots\dots(2)$$

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa peningkatan daya microwave dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi, yang mencapai kondisi optimum pada daya sekitar 600 W. Namun, peningkatan daya yang lebih tinggi, pada 700 W dan 800 W, cenderung menurunkan efisiensi adsorpsi. Hal ini dapat disebabkan oleh kemungkinan kejenuhan adsorben atau berkurangnya efektivitas situs aktif pada permukaan karbon aktif pada daya tinggi. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Oktaviani pada tahun 2024 yang melaporkan bahwa karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang diaktivasi menggunakan microwave menghasilkan efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar 99,32% pada perlakuan 600 W selama 10 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 365,8 mg/g. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa energi yang diberikan mampu mengembangkan pori-pori adsorben secara optimal sehingga luas permukaan dan jumlah situs aktif meningkat [15]. Pada penelitian ini, efisiensi adsorpsi tertinggi juga diperoleh pada perlakuan yang sama, yaitu sebesar 99,71%, yang mengindikasikan bahwa kondisi tersebut merupakan perlakuan yang efektif untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi metilen biru.

Sebaliknya, peningkatan daya hingga 700 W dan 800 W menyebabkan efisiensi adsorpsi menurun. Penurunan tersebut diduga terjadi akibat panas yang berlebihan sehingga menyebabkan kerusakan atau penyusutan struktur pori adsorben dan mengurangi jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi. Pernyataan ini didukung oleh Kundu tahun 2015 yang menyatakan bahwa penggunaan daya microwave yang terlalu tinggi maupun waktu pemanasan yang terlalu lama dapat menyebabkan degradasi pada karbon aktif sehingga menurunkan kemampuannya [16]. Oleh karena itu, perlakuan 600 W selama 10 menit dapat dianggap sebagai kondisi terbaik karena menghasilkan efisiensi adsorpsi tertinggi tanpa menyebabkan kerusakan signifikan pada struktur adsorben.

*Analisa Scanning Electron Microscope (SEM)*

Hasil pengujian adsorpsi Kristal Violet pada karbon aktif dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Pengujian ini bertujuan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan karbon aktif sebelum dan sesudah aktivasi pada level mikroskopis. Melalui SEM, dapat dilihat perubahan jumlah, ukuran, dan distribusi pori.



Gambar 5: Morfologi permukaan karbon perbesaran 5000x (a) sebelum aktivasi (b) Aktivasi dengan Variabel Daya 600 Watt dan Waktu 10 Menit (c) Aktivasi dengan Variabel Daya 800 Watt dan Waktu 10 Menit.

Hasil analisis SEM karbon aktif sebelum aktivasi menunjukkan permukaan yang relatif padat dengan pori-pori yang sedikit dan distribusi tidak merata. Struktur yang tersusun rapat ini menunjukkan luas permukaan spesifik yang rendah sehingga kapasitas adsorpsi awal juga terbatas. Kondisi ini sesuai dengan temuan Astuti tahun 2018 yang menyatakan bahwa karbon sebelum aktivasi memiliki pori kecil dan permukaan yang belum terekspos sepenuhnya, sehingga luas permukaan efektif untuk adsorpsi masih rendah [17]. Selain itu, Achaw tahun 2012 menekankan bahwa porositas karbon pada tahap awal sangat dipengaruhi oleh struktur seluler bahan baku dan belum mengalami pembentukan pori yang signifikan, sehingga permukaan karbon tampak homogen dan kurang berkembang [18].

Hasil Analisis SEM karbon aktif setelah di aktivasi dengan variabel daya 600 watt dan waktu 10 menit menunjukkan perubahan morfologi yang signifikan. Permukaan karbon menjadi lebih terbuka dan jumlah pori meningkat, sementara partikel asing yang menutupi pori sebagian besar terangkat. Proses aktivasi ini secara langsung memengaruhi variabel morfologi permukaan, luas permukaan spesifik, dan kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap Kristal Violet. Aktivasi membuka pori yang sebelumnya tertutup, meningkatkan luas permukaan aktif, dan memperbaiki distribusi pori sehingga kemampuan adsorpsi meningkat. Astuti tahun 2018 menjelaskan bahwa aktivasi menyebabkan pergeseran pelat karbon dan pengembangan mikropori menjadi makropori, sementara Achaw tahun 2012 menyebutkan bahwa thermal stress dan agen aktivasi membentuk pori baru serta membersihkan residu, menghasilkan morfologi karbon aktif yang lebih heterogen dan akses ke mikropori yang lebih baik.

Hasil Analisis SEM karbon aktif setelah di aktivasi dengan variabel daya 800 watt dan waktu 10 menit dapat merusak pori dari karbon aktif dibandingkan dengan aktivasi pada daya 600 W. Pori - pori menjadi tidak teratur yang mengakibatkan kristal violet sulit untuk menjangkau permukaan aktif. Partikel penghalang yang menutupi pori sebagian besar terangkat, dan terbentuknya retakan mikro akibat thermal stress menambah luas permukaan total, meskipun beberapa dinding pori mulai mengalami retakan lebih lebar akibat paparan microwave yang kuat. Fenomena ini menegaskan adanya trade-off antara pembukaan pori dan stabilitas struktur, meskipun morfologi pori membaik, paparan berlebihan berpotensi merusak dinding pori sehingga menurunkan kualitas karbon aktif. Hal ini sejalan dengan Kundu tahun 2015 yang menyatakan bahwa daya microwave terlalu tinggi atau waktu pemanasan yang terlalu lama dapat menyebabkan degradasi karbon aktif dan menurunkan efisiensi adsorpsi [16]. Hal serupa juga diamati oleh Aulia dan Khair tahun 2022 di mana paparan berlebihan mengurangi luas permukaan dan kemampuan adsorpsi karbon aktif [19]. Dengan demikian, meskipun aktivasi microwave efektif membuka pori, memperbaiki distribusi, dan meningkatkan morfologi karbon, penentuan kondisi daya dan durasi yang tepat tetap krusial untuk memperoleh karbon aktif dengan kapasitas adsorpsi Kristal Violet yang tinggi.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, karbon aktif berkualitas tinggi berhasil diperoleh dari Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) melalui variasi daya dan waktu pemanasan menggunakan microwave, didapatkan kesimpulan yaitu efisiensi bioadsorpsi karbon aktif mencapai puncak 99,71% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 9,9595 mg/g pada 600 Watt selama 10 menit. Kondisi terbaik aktivasi bioadsorben diperoleh pada daya 600 W selama 10 menit. Temuan ini mengindikasikan bahwa aktivasi berbasis microwave berpotensi menjadi metode pengolahan TKKS yang efisien dan bernilai tambah, sekaligus mendukung upaya pemanfaatan limbah industri kelapa sawit sebagai bioadsorben ramah lingkungan.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] T. de S. Pereira and G. Fernandino, "Evaluation of solid waste management sustainability of a coastal municipality from northeastern Brazil," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 179, p. 104839, 2019.
- [2] P. Joshi and C. Visvanathan, "Sustainable management practices of food waste in Asia: Technological and policy drivers," *J. Environ. Manage.*, vol. 247, pp. 538–550, 2019.
- [3] S. Das, S.-H. Lee, P. Kumar, K.-H. Kim, S. S. Lee, and S. S. Bhattacharya, "Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability," *J. Clean. Prod.*, vol. 228, pp. 658–678, 2019.
- [4] A. U. Zaman, "A comprehensive review of the development of zero waste management : lessons learned and guidelines," *J. Clean. Prod.*, pp. 1–14, 2014.
- [5] A. A. Babaei, N. Alavi, G. Goudarzi, P. Teymouri, K. Ahmadi, and M. Rafiee, "Household recycling knowledge, attitudes and practices towards solid waste management," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 102, pp. 94–100, 2015.
- [6] K.-G. Tiew, N. E. A. Basri, H. Deng, K. Watanabe, S. M. Zain, and S. Wang, "Comparative study on recycling behaviours between regular recyclers and non regular recyclers in Malaysia," *J. Environ. Manage.*, vol. 237, pp. 255–263, 2019.

- [7] A. Mesjasz-Lech, “Reverse logistics of mun[1] I. Emilia, L. Ardila, and P. Anggraini, “Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) menjadi pupuk kompos di Desa Suka Damai Kecamatan Tungkal Jaya Musi Banyuasin,” *Environmental Science Journal*, vol. 2, no. 2, 2024.
- [2] S. Fevriera and F. Safara Devi, “Analisis produksi kelapa sawit Indonesia: Pendekatan mikro dan makro ekonomi,” *Transformatif*, vol. 12, no. 1, pp. 1–16, 2023.
- [3] F. Febriyanti et al., “Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit menjadi bio-char, bio-oil dan gas dengan metode pirolisis,” *Jurnal Chemurgy*, vol. 3, no. 2, 2019.
- [4] A. Asri, M. Arsyad, and D. Wahyuni, “Uji kinerja karbon aktif tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai reusable adsorbent logam besi pada air gambut,” *Jurnal Fisika*, vol. 8, no. 2, 2023.
- [5] N. B. Osman, N. Shamsuddin, and Y. Uemura, “Activated carbon of oil palm empty fruit bunch (EFB); core and shaggy,” *Procedia Engineering*, vol. 148, pp. 758–764, 2016, doi:10.1016/j.proeng.2016.06.610.
- [6] G. Duran-Jimenez et al., “Single-step preparation of activated carbons from pine wood, olive stones and nutshells by KOH and microwaves: Influence of ultra-microporous for high CO<sub>2</sub> capture,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 499, 2024, doi:10.1016/j.cej.2024.156135.
- [7] T. Somsiripan and C. Sangwichien, “Enhancement of adsorption capacity of methylene blue, malachite green, and rhodamine B onto KOH activated carbon derived from oil palm empty fruit bunches,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 16, no. 12, 2023, doi:10.1016/j.arabjc.2023.105270.
- [8] H. Lee, S. Fiore, and F. Berruti, “Adsorption of methyl orange and methylene blue on activated biocarbon derived from birchwood pellets,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 191, 2024, doi:10.1016/j.biombioe.2024.107446.
- [9] G. K. Cheruiyot et al., “Adsorption of toxic crystal violet dye using coffee husks: Equilibrium, kinetics and thermodynamics study,” *Scientific African*, vol. 5, 2019, doi:10.1016/j.sciaf.2019.e00116.
- [10] G. Greco et al., “Biomass-derived carbons physically activated in one or two steps for CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> separation,” *Renewable Energy*, vol. 191, pp. 122–133, 2022, doi:10.1016/j.renene.2022.04.035.
- [11] M. F. Mohamad Yusop, E. M. J. Mohd Johan Jaya, and M. A. Ahmad, “Single-stage microwave assisted coconut shell based activated carbon for removal of Zn(II) ions from aqueous solution – optimization and batch studies,” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 15, no. 8, 2022, doi:10.1016/j.arabjc.2022.104011.
- [12] S. Biti et al., “Greener carbon capture using microwave heating for the development of cellulose-based adsorbents,” *Fuel*, vol. 358, 2024, doi:10.1016/j.fuel.2023.130246.
- [13] F. Dimawarnita et al., “Characterization of cellulose from oil palm empty fruit bunches by fast delignification process with different solvents,” *Journal Menara Perkebunan*, vol. 91, no. 2, 2023, doi:10.22302/iribb.jur.mp.v91i2.542.
- [14] M. Zhang, B. Mi, and Y. Dong, “Modification of activated carbon by means of microwave heating and its effects on the pore texture and surface chemistry,” *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 5, pp. 1791–1795, 2013.
- [15] Z. N. Oktaviani et al., “Sintesis karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit dengan aktivator gelombang mikro dan pengujian kualitas berdasarkan SNI 06-3730-1995,” *Newton-Maxwell Journal of Physics*, vol. 5, no. 1, 2024.
- [16] Kundu, Anirban, et al. "Optimisation of the process variables in production of activated carbon by microwave heating." *RSC advances* 5.45 (2015): 35899-35908.
- [17] A. D. Astuti, D. A. Handayani, and D. A. Wulandari, “Adsorpsi methyl violet oleh karbon aktif dari limbah tempurung kelapa dengan aktivator ZnCl<sub>2</sub> menggunakan pemanasan gelombang mikro,” *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, vol. 13, no. 2, pp. 189–200, 2018, doi:10.23955/rkl.v13i2.11945.
- [18] O.-W. Achaw and G. Afrane, “The evolution of pore structure of coconut shells during the preparation of coconut shell-based activated carbons,” *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 112, pp. 284–290, 2008.
- [19] Aulia and M. Khair, “Preparasi karbon aktif dari sabut kelapa dengan aktivator gelombang mikro untuk adsorpsi rhodamin B,” *Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*, vol. 11, no. 1, pp. 62–xx, 2022.