

PENGARUH VARIASI SUHU PADA MICROWAVE DIGESTER UNTUK DELIGNIFIKASI TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT

Gabriella Providencia Matullessya¹, Ra'ida Raudhatussyarifah^{1*}, Nia Gusti Pandita¹, Hadistya Suryadri¹, Rara Ayu Lestary¹, Rosmawati Sipayung¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jambi, Jambi;

Email : gabriella.providencia@gmail.com (G.P,M), rraudhatussyarifah@unja.ac.id (R.R),
niagustipandita@gmail.com (N.G.P), hadistya.suryadri@unja.ac.id (H.S),
raraayulestary@unja.ac.id (R.A.L), rosmawatisipayung@unja.ac.id (R.S);

*E-mail Korespondensi : rraudhatussyarifah@unja.ac.id

Abstrak : Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) merupakan salah satu limbah padat hasil industri kelapa sawit yang masih kurang dimanfaatkan secara optimal padahal memiliki kandungan selulosa yang tinggi dan berpotensi digunakan sebagai bahan baku material biopolimer. Namun kandungan lignin yang besar pada struktur TKKS menjadi hambatan utama karena bersifat kompleks dan sukar terdegradasi. Oleh karena itu diperlukan proses pendahuluan (pretreatment) yang efisien untuk menguraikan lignin tanpa merusak struktur selulosa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi suhu terhadap kinerja proses delignifikasi TKKS menggunakan metode Microwave-Assisted Extraction (MAE) dengan pelarut NaOH. Proses dilakukan pada daya konstan 300 W dengan variasi suhu 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, dan 160°C. Parameter yang dianalisis meliputi rendemen padatan, komposisi kimia dengan metode Chesson-Datta, dan identifikasi gugus fungsi menggunakan FTIR. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan suhu menurunkan yield padatan dari 86,27% pada 80°C menjadi 74,37% pada 140°C sementara kandungan lignin berkurang signifikan hingga 22,63% pada 160°C. Analisis FTIR memperlihatkan penurunan intensitas pita aromatik lignin pada 1593 cm⁻¹ serta penguatan pita C-O di rentang 1100-1028 cm⁻¹ menandakan peningkatan kemurnian selulosa. Kondisi optimum

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2026, Vol. 7, No. 1, pp 1 – 12

Received : 29 Desember 2025

Accepted : 9 Februari 2026

Published : 2 Maret 2026



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

dicapai pada suhu 160°C dengan efisiensi delignifikasi tertinggi dan stabilitas selulosa tetap terjaga. Hasil ini menunjukkan bahwa MAE bersuhu tinggi efektif digunakan untuk meningkatkan kualitas biomassa TKKS sebagai sumber bahan baku berkelanjutan di industri hijau.

Kata Kunci : TKKS, delignifikasi, Microwave-Assisted Extraction, lignin, FTIR

Abstract : Oil palm empty fruit bunches (OPEFB) represent one of the major solid residues generated from the palm oil industry that remain underutilized, despite being rich in cellulose and having high potential as a renewable source for biopolymer-based materials. However the presence of lignin in large quantities within its lignocellulosic structure hinders further processing due to its complex and recalcitrant nature. Therefore an effective pretreatment is required to degrade lignin selectively while preserving the cellulose fraction. This study aims to investigate the effect of temperature variation on the delignification performance of OPEFB using an alkaline Microwave-Assisted Extraction (MAE) process. The experiments were conducted at a constant microwave power of 300 W with reaction temperatures of 80°C, 100°C, 120°C, 140°C, and 160°C. The evaluated parameters included solid yield, chemical composition based on the Chesson-Datta method, and functional group identification through FTIR spectroscopy. The results demonstrated that increasing temperature reduced the solid yield from 86.27% at 80°C to 74.37% at 140°C, while lignin content significantly declined to 22.63% at 160°C. FTIR analysis revealed a noticeable decrease in aromatic lignin peaks at 1593 cm⁻¹ accompanied by an enhancement of C–O stretching vibrations within the 1100–1028 cm⁻¹ range indicating improved cellulose purity. The optimum condition was observed at 160°C achieving the highest delignification efficiency without considerable cellulose degradation. These findings suggest that high-temperature MAE is an effective and environmentally friendly approach for enhancing the quality of OPEFB cellulose, providing promising potential for the development of sustainable green materials.

Keywords : OPEFB, delignification, Microwave-Assisted Extraction, lignin, FTIR

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan produksi kelapa sawit tertinggi di dunia sehingga aktivitas industri pengolahannya menghasilkan limbah biomassa

dalam jumlah besar. Salah satu limbah padat utama yang dihasilkan dari proses pengolahan tandan buah segar (TBS) adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dengan proporsi sekitar 20–25% dari total TBS yang diolah (Pandita et al., 2025). Apabila tidak dimanfaatkan secara optimal akumulasi TKKS dapat menimbulkan permasalahan lingkungan seperti peningkatan emisi gas rumah kaca akibat dekomposisi anaerob yang menghasilkan metana, serta penurunan kualitas lingkungan di sekitar area industri kelapa sawit.

TKKS sendiri merupakan biomassa lignoselulosa yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam jumlah signifikan. Kandungan tersebut menjadikan TKKS berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku energi baru dan terbarukan khususnya untuk produksi bioetanol generasi kedua, bioenergi padat, maupun bahan kimia berbasis biomassa (Mikulski & Kłosowski, 2022). Namun pemanfaatan selulosa dari TKKS masih menghadapi kendala utama akibat tingginya kandungan lignin yang membentuk struktur kompleks dan bersifat hidrofobik. Lignin berfungsi sebagai matriks pelindung yang menghambat akses terhadap selulosa, sehingga menurunkan efisiensi proses konversi biomassa.

Oleh karena itu proses *pretreatment* atau delignifikasi menjadi tahap penting untuk membuka struktur lignoselulosa dan meningkatkan aksesibilitas selulosa. Berbagai metode delignifikasi telah dikembangkan seperti perlakuan kimia menggunakan asam atau alkali, perlakuan biologis, serta kombinasi metode fisikokimia. Meskipun metode konvensional tersebut mampu menurunkan kandungan lignin, penerapannya sering kali dibatasi oleh kebutuhan energi yang tinggi, waktu proses yang relatif lama, serta potensi pembentukan senyawa inhibitor yang dapat mengganggu proses konversi lanjutan (Kamal et al., 2023).

Dalam beberapa tahun terakhir teknologi pemanasan berbasis gelombang mikro melalui metode *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dikembangkan sebagai alternatif *pretreatment* yang lebih efisien. MAE memungkinkan pemanasan berlangsung secara cepat dan merata melalui mekanisme rotasi molekul polar dan konduksi ionik. Interaksi gelombang mikro dengan molekul air dan ion dalam larutan menghasilkan panas secara volumetrik, sehingga mempercepat penetrasi pelarut ke dalam jaringan biomassa dan meningkatkan laju reaksi delignifikasi (Gill et al., 2024). Dibandingkan pemanasan konvensional MAE dilaporkan mampu menurunkan konsumsi energi dan waktu proses secara signifikan.

Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa kombinasi MAE dengan larutan alkali khususnya natrium hidroksida (NaOH), efektif dalam melarutkan lignin dan meningkatkan fraksi selulosa pada biomassa lignoselulosa. Perlakuan MAE–NaOH

dilaporkan mampu menurunkan kandungan lignin sekaligus meningkatkan keterbukaan struktur selulosa, yang berimplikasi positif terhadap proses hidrolisis dan konversi energi selanjutnya (Nusbah et al., 2025). Selain itu pemanfaatan gelombang mikro pada biomassa kelapa sawit juga dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi energi dibandingkan metode pemanasan konvensional (Haq et al., 2021)

Meskipun demikian efektivitas proses MAE sangat dipengaruhi oleh parameter operasi salah satunya adalah suhu proses. Variasi suhu menentukan distribusi energi *microwave*, tingkat degradasi lignin, serta kestabilan struktur selulosa. Suhu yang terlalu rendah dapat menyebabkan delignifikasi tidak optimal, sedangkan suhu yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan degradasi selulosa dan menurunkan kualitas biomassa sebagai bahan baku energi terbarukan (Cui et al., 2022). Oleh karena itu kajian mengenai pengaruh variasi suhu MAE terhadap delignifikasi TKKS masih diperlukan untuk memperoleh kondisi operasi yang optimal.

Berdasarkan latar belakang tersebut penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi suhu pada proses *Microwave-Assisted Extraction* menggunakan larutan NaOH terhadap efektivitas delignifikasi tandan kosong kelapa sawit. Evaluasi dilakukan melalui analisis yield padatan, penentuan kadar lignin menggunakan metode Chesson–Datta, serta karakterisasi perubahan gugus fungsi dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pretreatment biomassa berbasis MAE yang efisien, ramah lingkungan, dan sesuai untuk mendukung pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai sumber energi baru dan terbarukan.

2. Metode Penelitian

2.1 Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang diperoleh dari limbah pabrik pengolahan kelapa sawit. TKKS dipilih karena memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi dan ketersediaannya melimpah. Bahan kimia yang digunakan meliputi natrium hidroksida (NaOH) sebagai agen delignifikasi dan akuades sebagai pelarut. Seluruh bahan kimia yang digunakan memiliki tingkat kemurnian teknis dan digunakan tanpa perlakuan lanjutan. Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi microwave digester sebagai sumber pemanasan berbasis gelombang mikro, oven pengering, grinder, ayakan, neraca analitik, serta seperangkat alat gelas laboratorium. Analisis gugus fungsi dilakukan menggunakan instrumen *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*

(FTIR), sedangkan analisis komposisi lignoselulosa dilakukan berdasarkan metode kimia standar.

2.2 Preparasi Bahan

Tandan kosong kelapa sawit terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran yang menempel, kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105 °C hingga mencapai berat konstan. TKKS kering selanjutnya digiling dan diayak hingga diperoleh ukuran partikel yang seragam, yaitu sekitar 1–2 mm. Tahap preparasi ini bertujuan untuk meningkatkan keseragaman bahan dan memperluas luas permukaan, sehingga proses delignifikasi dapat berlangsung lebih efektif.

2.3 Proses Delignifikasi dengan Microwave-Assisted Extraction

Proses delignifikasi dilakukan menggunakan metode *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) dengan larutan NaOH sebagai pelarut alkali. Sejumlah tertentu TKKS dimasukkan ke dalam reaktor microwave bersama larutan NaOH 3% (b/v) dengan rasio padat-cair 1:10. Proses MAE dilakukan pada daya microwave tetap sebesar 300 W dengan variasi suhu pemanasan sesuai kondisi penelitian, yaitu 80 °C, 100 °C, 120 °C, 140 °C, dan 160 °C, selama waktu pemanasan 12 menit. Selama proses MAE, energi gelombang mikro berinteraksi dengan molekul polar dalam sistem, menghasilkan pemanasan volumetrik yang mempercepat penetrasi larutan alkali ke dalam struktur lignoselulosa. Setelah proses selesai, campuran didinginkan hingga suhu ruang sebelum dilakukan pemisahan fase.

2.4 Pemisahan dan Pengeringan Residu

Hasil delignifikasi disaring untuk memisahkan residu padatan dari larutan. Residu padatan kemudian dicuci menggunakan akuades hingga pH filtrat mendekati netral, guna menghilangkan sisa larutan alkali yang masih tertinggal. Padatan yang telah dicuci selanjutnya dikeringkan kembali pada suhu 105 °C hingga berat konstan dan disimpan dalam wadah tertutup untuk analisis lebih lanjut.

2.5 Metode Analisis

Yield padatan dihitung untuk mengevaluasi perubahan massa biomassa setelah proses delignifikasi. Analisis komposisi lignoselulosa, yang meliputi kandungan lignin, hemiselulosa, dan selulosa, dilakukan menggunakan metode Chesson–Datta. Metode ini digunakan untuk menilai efektivitas penghilangan lignin akibat perlakuan MAE.

Selain itu, karakterisasi perubahan struktur kimia biomassa dilakukan menggunakan FTIR. Analisis FTIR bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan gugus fungsi utama, khususnya gugus aromatik lignin dan gugus hidroksil selulosa, sebagai indikator keberhasilan proses delignifikasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Yield Padatan

Hasil pengujian yield padatan pada berbagai variasi suhu proses delignifikasi menggunakan *Microwave* ditunjukkan pada Tabel 1. Nilai yield tertinggi diperoleh pada suhu 80°C sebesar 86,27% sedangkan nilai terendah dicapai pada suhu 140°C sebesar 74,37%. Secara umum peningkatan suhu menunjukkan penurunan yield padatan sebelum kembali meningkat pada suhu 160°C.

Tabel 1. Persen yield padatan pada berbagai variasi daya micowave

Suhu (°C)	Yield Padatan (%)
80	86,27
100	78,36
120	77,69
140	74,37
160	76,96

Penurunan yield padatan hingga suhu 140°C menunjukkan bahwa proses delignifikasi berlangsung lebih efektif pada kondisi suhu menengah. Kenaikan suhu mempercepat reaksi pemanasan volumetrik dari gelombang mikro yang bekerja langsung pada molekul polar sehingga energi dapat diserap lebih cepat dan merata. Proses ini meningkatkan penetrasi larutan NaOH ke dalam dinding sel biomassa mengakibatkan pemutusan ikatan lignin dan pelarutan sebagian hemiselulosa. Akibatnya jumlah residu padatan menurun seiring bertambahnya suhu perlakuan.

Nilai terendah pada suhu 140°C menunjukkan bahwa kondisi ini merupakan titik paling optimal untuk menghilangkan lignin tanpa merusak struktur selulosa. Hal ini sejalan dengan temuan (Vinhas et al., 2024), yang melaporkan bahwa suhu ideal pada metode *Microwave Assisted Extraction* (MAE) berada pada rentang 120-140°C di mana reaksi depolimerisasi lignin berlangsung maksimal. Sebaliknya pada suhu 160°C nilai yield padatan meningkat menjadi 76,96% diduga akibat terjadinya reaksi kondensasi ulang lignin (repolimerisasi) atau degradasi selulosa akibat paparan panas berlebih. Fenomena serupa juga dijelaskan (Vinhas et al., 2024), bahwa suhu di atas 150°C dapat menurunkan efisiensi delignifikasi akibat terbentuknya kembali ikatan aromatik pada lignin.

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa 140°C merupakan suhu optimum untuk proses delignifikasi TKKS berbasis MAE dengan larutan NaOH 3% karena memberikan yield padatan terendah. Nilai ini menunjukkan bahwa proses pelarutan lignin dan hemiselulosa berlangsung paling efektif sementara struktur selulosa masih tetap terjaga.

3.2. CHESSON-DATA

Analisis komposisi kimia TKKS dilakukan menggunakan metode Chesson-Datta untuk menentukan kandungan lignin setelah proses delignifikasi. Nilai rata-rata lignin hasil pengujian pada berbagai suhu ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Chesson-Data

Suhu (°C)	Daya (W)	Lignin (%)
80	300	28,3
100	300	26,57
120	300	24,58
140	300	23,86
160	300	22,63

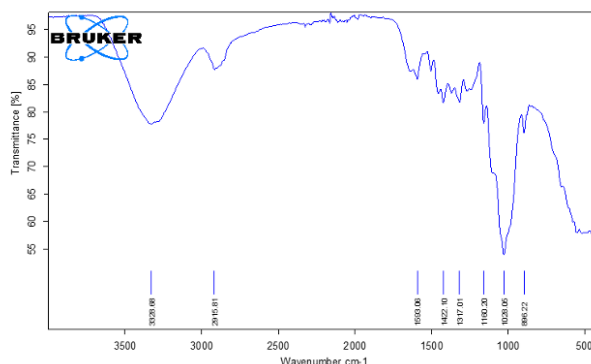
Berdasarkan Tabel 2 kandungan lignin terlihat menurun seiring meningkatnya suhu proses pada suhu 80°C, lignin masih tinggi (28,30%) karena energi yang diberikan belum cukup untuk memecah struktur kompleks lignoselulosa. Ketika suhu dinaikkan lignin terdegradasi secara bertahap hingga mencapai nilai terendah 22,63% pada 160°C yang menandakan bahwa proses delignifikasi berlangsung lebih intensif pada kondisi suhu tinggi. Peningkatan suhu memperkuat efektivitas metode *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) melalui pemanasan volumetrik cepat di mana energi gelombang mikro diserap langsung oleh molekul polar dalam larutan NaOH. Proses ini meningkatkan difusi larutan alkali ke jaringan serat mempercepat pemutusan ikatan eter dan ester yang mengikat lignin dan hemiselulosa sehingga lebih banyak lignin yang larut keluar dari struktur biomassa.

Hasil ini sejalan dengan (Vinhas et al., 2024) yang menjelaskan bahwa suhu 120-140°C merupakan rentang optimum untuk memecah lignin tanpa merusak selulosa. Namun pada kondisi tertentu seperti waktu pemanasan singkat (12 menit) dan konsentrasi NaOH rendah (3%), suhu 160°C masih mampu memberikan delignifikasi yang maksimal tanpa menyebabkan degradasi berlebih. Hasil ini menandakan bahwa suhu 160°C mampu menghasilkan proses delignifikasi yang paling efektif di antara variasi suhu lainnya. Energi aktivasi yang tercapai pada kondisi ini memungkinkan lignin terdegradasi secara maksimal tanpa menyebabkan kerusakan signifikan pada selulosa. Oleh karena itu kombinasi 160°C dan 300 W dapat dikategorikan sebagai kondisi reaktif-optimal dalam proses delignifikasi TKKS berbasis MAE dengan larutan NaOH 3%, karena mampu menghasilkan kandungan lignin terendah dengan kestabilan struktur selulosa yang tetap terjaga.

3.3. FTIR

Berdasarkan hasil analisis FTIR sampel TKKS pada perlakuan 160°C/300 W menunjukkan penurunan intensitas pita aromatik di sekitar 1593 cm⁻¹, yang berkaitan dengan getaran C=C cincin aromatik dari lignin. Penurunan intensitas di wilayah ini menunjukkan bahwa proses delignifikasi berlangsung optimal karena sebagian besar struktur aromatik lignin telah terdegradasi menjadi fragmen yang larut dalam larutan NaOH. Kondisi suhu tinggi mempercepat pemutusan ikatan eter dan ester antara lignin dan hemiselulosa sehingga lignin lebih mudah terlepas dari jaringan biomassa. Hal ini sejalan dengan hasil uji Chesson-Datta di mana kandungan lignin menurun hingga 22,63% menjadi nilai terendah dibandingkan perlakuan suhu lainnya. Proses ini menunjukkan bahwa energi aktivasi untuk reaksi delignifikasi telah tercapai secara optimal pada 160°C dengan tetap mempertahankan stabilitas fraksi selulosa.

Hasil ini konsisten dengan temuan (Vinhas et al., 2024) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu pada sistem Microwave-Assisted Extraction (MAE) berbasis alkali dapat mempercepat depolimerisasi struktur aromatik lignin tanpa menyebabkan degradasi berlebih pada selulosa. Hasil serupa pada proses isolasi selulosa dari tongkol jagung, di mana penurunan puncak aromatik (1500-1600 cm⁻¹) pada FTIR digunakan sebagai indikator keberhasilan penghilangan lignin setelah delignifikasi.



Gambar 2. Spektrum FTIR TKKS pada Kondisi 160°C / 300 W

Spektrum FTIR dari sampel TKKS hasil perlakuan *Microwave-Assisted Extraction* (MAE) pada suhu 160°C dan daya 300 W menunjukkan perubahan karakteristik kimia yang signifikan dibandingkan bahan awal. Pita serapan lebar yang muncul pada bilangan gelombang sekitar 3329 cm⁻¹ merepresentasikan getaran regangan gugus hidroksil (-OH) dari selulosa dan hemiselulosa menandakan bahwa struktur polisakarida utama masih bertahan setelah perlakuan. Puncak pada 2946 cm⁻¹ menggambarkan regangan C-H alifatik yang berasal dari gugus metil dan metilen pada rantai karbon biomassa.

Sementara itu pita pada 1593 cm^{-1} menunjukkan adanya cincin aromatik khas lignin. Intensitas serapan di daerah ini menurun dibandingkan dengan bahan mentah yang mengindikasikan bahwa sebagian besar lignin telah terdegradasi akibat perlakuan suhu tinggi dan reaksi alkali selama proses MAE. Selain itu munculnya serapan pada 1422 cm^{-1} dan 1371 cm^{-1} menunjukkan keberadaan getaran C-H dan C-O dari struktur selulosa mengisyaratkan bahwa kerangka selulosa tetap stabil meskipun sebagian lignin terlepas.

Peningkatan serapan di wilayah $1100\text{-}1028\text{ cm}^{-1}$ memperlihatkan penguatan ikatan C-O dan C-O-C yang berkaitan dengan glikosidik selulosa. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses delignifikasi tidak hanya mengurangi lignin tetapi juga membuka struktur serat sehingga gugus oksigen selulosa lebih terekspos. Adapun pita pada 896 cm^{-1} merupakan ciri khas dari ikatan β 1,4-glikosidik yang menandakan bahwa rantai utama selulosa masih terjaga.

Secara keseluruhan hasil analisis FTIR ini membuktikan bahwa perlakuan MAE pada suhu 160°C efektif dalam menghilangkan lignin tanpa menyebabkan degradasi besar pada selulosa. Penurunan pita aromatik lignin diikuti dengan peningkatan pita serapan C-O selulosa menunjukkan keberhasilan proses delignifikasi.

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh, peningkatan suhu dalam proses *Microwave Assisted Extraction* (MAE) terbukti berpengaruh nyata terhadap efisiensi delignifikasi dan karakter struktur kimia TKKS. Pada kondisi suhu tinggi, terutama 160°C reaksi antara lignin dan larutan alkali berlangsung lebih intensif. Hal ini menyebabkan ikatan eter dan ester yang menghubungkan lignin dengan hemiselulosa dan selulosa terputus, sehingga lignin terlarut lebih mudah ke dalam medium reaksi. Fenomena ini sejalan dengan (Lozano Pérez et al., 2024), yang menyatakan bahwa penggunaan mikrowave dapat mempercepat pemutusan ikatan lignin hingga menghasilkan penurunan kadar lignin lebih besar dibandingkan pemanasan konvensional.

Selain meningkatkan laju reaksi perlakuan mikrowave juga menghasilkan pemanasan volumetrik yang merata di seluruh matriks biomassa. Menurut (Banu J et al., 2021), panas yang terbentuk dari osilasi molekul polar pada gelombang mikro mampu memperluas pori-pori dan merusak struktur dinding sel lignoselulosa. Kondisi ini mempercepat penetrasi larutan NaOH ke dalam serat TKKS dan mendukung pelepasan lignin yang terperangkap dalam jaringan biomassa. Hal ini sesuai dengan penurunan kadar lignin pada suhu 160°C dalam penelitian ini, di mana proses delignifikasi berlangsung paling efektif tanpa mengakibatkan kerusakan besar pada selulosa.

Analisis FTIR memperkuat hasil tersebut dengan menunjukkan penurunan intensitas pita aromatik lignin di sekitar 1593 cm^{-1} serta peningkatan serapan gugus C-O pada $1100\text{-}1028\text{ cm}^{-1}$. Perubahan ini menandakan keberhasilan proses delignifikasi dan peningkatan kemurnian selulosa. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Apaydin Varol & Mutlu, 2023), yang menemukan bahwa MAE berbasis pelarut alkali atau deep eutectic solvent mampu menghasilkan biomassa dengan kadar selulosa lebih tinggi. Secara umum peningkatan suhu dan daya mikrowave memperbaiki efisiensi penghilangan lignin, namun bila melebihi batas tertentu dapat menyebabkan degradasi sebagian hemiselulosa. Oleh karena itu pengaturan parameter operasi menjadi kunci penting untuk menjaga keseimbangan antara efektivitas reaksi dan stabilitas komponen utama. (Kamal et al., 2023) juga menegaskan bahwa dalam pengolahan biomassa kelapa sawit, pengendalian suhu dan konsentrasi alkali harus dilakukan secara cermat agar struktur serat tetap terjaga dan hasil delignifikasi lebih konsisten.

Dengan mempertimbangkan keseluruhan hasil, kondisi 160°C pada daya 300 W dapat dianggap sebagai titik optimum dalam proses delignifikasi TKKS menggunakan MAE. Pendekatan ini tidak hanya mempercepat proses kimia, tetapi juga dinilai lebih hemat energi dan ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional. Selulosa hasil perlakuan berpotensi dimanfaatkan untuk pengembangan bahan berbasis biopolimer seperti film biodegradable, kertas ramah lingkungan, atau adsorben alami. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi MAE dapat menjadi alternatif yang berkelanjutan dalam pengolahan limbah biomassa kelapa sawit menuju produksi material hijau bernilai ekonomi tinggi.

4. SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa metode Microwave-Assisted Extraction (MAE) berbasis NaOH efektif untuk menurunkan kandungan lignin pada tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Variasi suhu berpengaruh nyata terhadap hasil padatan dan tingkat delignifikasi. Peningkatan suhu menyebabkan yield padatan menurun, namun efisiensi penghilangan lignin meningkat. Kondisi terbaik dicapai pada suhu 160°C dan daya 300 W dengan kandungan lignin terendah sebesar 22,63% berdasarkan metode Chesson-Datta. Analisis FTIR menunjukkan penurunan pita aromatik pada 1593 cm^{-1} dan penguatan pita C-O di rentang $1100\text{-}1028\text{ cm}^{-1}$, menandakan selulosa tetap stabil dan lebih murni. Dengan demikian, suhu 160°C pada daya 300 W dapat ditetapkan sebagai kondisi optimum dalam proses delignifikasi TKKS menggunakan MAE. Pendekatan ini berpotensi dimanfaatkan

sebagai tahap awal pengolahan biomassa untuk menghasilkan bahan baku selulosa berkualitas bagi industri berkelanjutan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Apaydın Varol, E., & Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin. *Energies*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/en16093674>
- Banu J, R., Sugitha, S., Kavitha, S., Kannah R, Y., Merrylin, J., & Kumar, G. (2021). Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Enhanced Bioenergy Recovery: Effect of Lignocelluloses Recalcitrance and Enhancement Strategies. *Frontiers in Energy Research*, 9(November), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.646057>
- Cui, J. Y., Zhang, N., & Jiang, J. C. (2022). Effects of Microwave-Assisted Liquid Hot Water Pretreatment on Chemical Composition and Structure of Moso Bamboo. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.821982>
- Gill, A. S., Wong, K. H., Lim, S., Pang, Y. L., Ling, L., & Lau, S. Y. (2024). Investigation of Microwave Irradiation and Ethanol Pre-Treatment toward Bioproducts Fractionation from Oil Palm Empty Fruit Bunch. *Sustainability (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031275>
- Haq, I. U., Qaisar, K., Nawaz, A., Akram, F., Mukhtar, H., Zohu, X., Xu, Y., Mumtaz, M. W., Rashid, U., Ghani, W. A. W. A. K., & Choong, T. S. Y. (2021). Lignocellulosic Biomass_Energy Consumption. *Catalysts*, 11(3), 1–26.
- Kamal, A. F., Mardawati, E., Purwanto, E. H., & Rosalinda, S. (2023). Optimasi microwave-assisted pretreatment dalam delignifikasi asam oksalat pada kulit kakao menggunakan response surface methodology (RSM). *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 17(4), 724–736. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v17i4.15471>
- Lozano Pérez, A. S., Lozada Castro, J. J., & Guerrero Fajardo, C. A. (2024). Application of Microwave Energy to Biomass: A Comprehensive Review of Microwave-Assisted Technologies, Optimization Parameters, and the Strengths and Weaknesses. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/jmmp8030121>
- Mikulski, D., & Kłosowski, G. (2022). Delignification efficiency of various types of biomass using microwave - assisted hydrotropic pretreatment. *Scientific Reports*, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08717-9>
- Nusbah, S. S., Amir, M. M., Kalsum, U., & Bakhri, S. (2025). Pengembangan Delignifikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Bantuan Microwave terhadap Hasil Lignin Removal. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 5(1), 22–32.
- Pandita, N. G., Lestary, R. A., & Amalia, R. (2025). Optimalisasi Daya Microwave-Assisted Extraction (MAE) untuk Pelepasan Lignin dari TKKS. 8, 1–10.

Vinhas, S., Sarraguça, M., Moniz, T., Reis, S., & Rangel, M. (2024). A New Microwave-Assisted Protocol for Cellulose Extraction from Eucalyptus and Pine Tree Wood Waste. *Polymers*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/polym16010020>