

Pengembangan Katalis Berbasis Tungsten Oksida (WO₃) untuk Degradasi Limbah *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dengan Teknologi Fotokatalitik

Rospita Uli, Wibawa Hendra Saptutera, Dwiwahju Sasongko, dan Hary Devianto

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

Rospitauli24@gmail.com, whsaputera@itb.ac.id, sasongko@itb.ac.id, hardev@itb.ac.id

Abstrak

Industri minyak kelapa sawit menghasilkan limbah signifikan seperti POME yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. POME dapat merusak lingkungan terutama ekosistem perairan. Pengolahan POME penting untuk keberlanjutan industri ini. *Advanced Oxidation Processes* (AOPs), termasuk fotokatalitik, merupakan salah satu opsi teknologi yang dikembangkan untuk mendegradasi senyawa organik dalam limbah POME. Dalam studi ini, degradasi fotokatalitik limbah POME menggunakan katalis berbasis WO₃ dengan menggunakan lampu Xenon 500 W menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam mengurai limbah POME. Fotokatalis WO₃ disintesis menggunakan metode hidrotermal pada temperatur 180, 200, 220, dan 240 °C, menghasilkan struktur kristal *Hexagonal* dan *Orthorhombic*, dan Tipe V mesopori. Penggunaan katalis WO₃ dengan konsentrasi 1 g/L mampu mengurangi *Chemical Oxygen Demand* (COD) hingga 48,05%, degradasi warna hingga 36,22%, dengan konstanta laju reaksi COD sebesar $3,7 \times 10^{-3}$ menit⁻¹.

Kata kunci: WO₃, POME, Fotokatalitik, AOPs, COD

Abstract

The palm oil industry generates significant waste, such as POME, which can pollute the environment if not properly managed. POME can particularly damage aquatic ecosystems. Treating POME is crucial for the sustainability of this industry. Advanced Oxidation Processes (AOPs), including photocatalysis, are being developed as a technological option to degrade organic compounds in POME waste. In this study, the photocatalytic degradation of POME waste using WO₃-based catalysts and a 500 W Xenon lamp showed that this method effectively breaks down POME waste. WO₃ photocatalysts were synthesized using a hydrothermal method at temperatures of 180, 200, 220, and 240°C, resulting in hexagonal and orthorhombic crystal structures and Type V mesopores. Using WO₃ at a concentration of 1 g/L can reduce *Chemical Oxygen Demand* (COD) up to 48.05%, color degradation by 36.22%, with a COD reaction rate constant of 3.7×10^{-3} min⁻¹.

Keywords: WO₃, POME, Photocatalysis, AOPs, COD

1. Pendahuluan

Industri minyak kelapa sawit merupakan sektor ekonomi yang penting, namun juga menghasilkan limbah yang cukup besar, termasuk *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Menurut data Kemenperin (2022), setiap ton minyak sawit dapat menghasilkan 2,5 m³ POME. Limbah ini merupakan hasil dari proses pengolahan tandan buah kelapa sawit dan mengandung senyawa organik, minyak, lemak, serta berbagai senyawa kimia lainnya. Konsentrasi senyawa organik yang tinggi dalam POME dapat menyebabkan dampak lingkungan yang serius jika tidak dikelola dengan baik, seperti pencemaran sumber air, penurunan kualitas air tanah, gangguan ekosistem perairan, dan kerusakan kehidupan akuatik. Oleh karena itu, pengolahan POME menjadi prioritas penting untuk menjaga kelestarian lingkungan dan keberlanjutan industri kelapa sawit.

Untuk mencari solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, teknologi fotokatalitik telah muncul sebagai alternatif teknologi yang unggul. Metode ini menggunakan katalis berbasis semikonduktor seperti Titanium Dioksida (TiO₂), Seng Oksida (ZnO), Besi (III) Oksida (Fe₂O₃), dan Tungsten Oksida (WO₃), yang diaktifkan oleh cahaya (Ultraviolet, cahaya tampak, dll) untuk mempercepat proses oksidasi senyawa organik dalam POME. Proses ini sangat efektif dalam mengurangi kandungan bahan organik dan polutan, menghadirkan solusi yang menjanjikan, berkelanjutan, dan efisien untuk pengolahan POME dalam industri kelapa sawit (Putri dkk., 2022)

WO₃ dipilih sebagai fotokatalis karena memiliki aktivitas fotokatalitik tinggi, stabilitas termal dan kimia yang baik, serta kemampuan menyerap cahaya UV dan tampak (Fakhri & Behrouz, 2015). Ketika terpapar cahaya, WO₃ menghasilkan pasangan elektron dan lubang untuk reaksi redoks, yang menguraikan senyawa organik dalam POME menjadi CO₂ dan H₂O (Prabhu dkk., 2018). Penelitian menunjukkan bahwa WO₃ efektif dalam mengurangi kandungan bahan organik, COD 48%, gradasi warna 51.15%, dan senyawa berbahaya lainnya dalam POME (Aqilah dkk., 2021).

Pada penelitian ini, pengembangan katalis WO₃ dengan variasi sintesis temperatur hidrotermal pada rentang 180-240°C dilakukan untuk melihat pengaruh temperatur sintesis pada struktur fasa kristal yang dihasilkan sehingga dapat

Info Makalah:

Dikirim : 07-29-24;
Revisi 1 : 10-29-24;
Revisi 2 : 02-21-25;
Diterima : 03-10-25.

Penulis Korespondensi:

Telp : -
e-mail : whsaputera@itb.ac.id

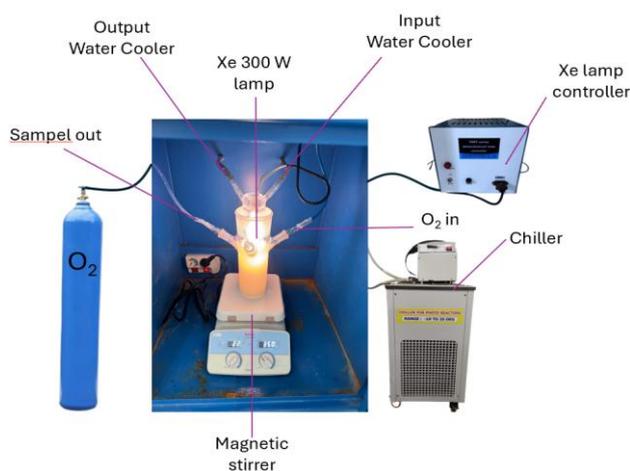
diketahui fasa kristal mana yang lebih ideal dan efisien untuk menguraikan limbah POME. Katalis yang dihasilkan dikarakterisasi sifat fisik dan kimia dengan menggunakan isoterm fisisorpsi nitrogen untuk menentukan luas permukaan dan ukuran pori dan difraksi sinar-X untuk menentukan kristalinitas dan struktur kristal WO₃. Pengujian aktivitas fotokatalitik untuk mendegradasi limbah POME dengan meninjau penurunan COD dan perubahan warna dilakukan dalam reaktor *batch* dengan menggunakan sumber sinar Xenon (Xe) 500 W ($\lambda = 200-100$ nm).

2. Metode

Penelitian ini dilakukan berdasarkan dua variabel yaitu variabel tetap dan berubah. Untuk variabel tetapnya adalah konsentrasi umpan katalis yaitu 1 g/L dan laju alir oksigen 100 mL/menit, sedangkan untuk variabel berubahnya adalah temperatur sintesis hidrotermal fotokatalis yaitu 180, 200, 220, dan 240 °C.

2.1. Bahan dan Peralatan Utama

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah WO₃ yang disintesis dengan metode hidrotermal menggunakan prekursor Na₂WO₄·2H₂O (Merck, ≥ 98%). Selain itu bahan kimia yang digunakan untuk sintesis fotokatalis adalah NaCl (Merck, ≥ 98%), HCl (Merck, ≥ 98%), dan aqua DM. Peralatan utama yang digunakan pada penelitian ini adalah fotoreaktor *immersed illumination* dengan volume 500 mL seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Foto Reaktor *Immersed Illumination*

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, yaitu : persiapan fotokatalis, persiapan limbah POME, karakterisasi katalis, Uji aktivitas, fotokatalis dengan menguji kadar COD dan warna.

2.2. Sintesis Fotokatalis WO₃

WO₃ disintesis dengan metode hidrotermal. Sebanyak 0,290 gram NaCl dan 0,825 gram Na₂WO₄·2H₂O ditimbang dan dilarutkan dalam larutan aquades 13 ml dan 4 ml HCl. Larutan diaduk selama 30 menit menggunakan *magnetic stirrer*. Larutan dipindahkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan pada temperatur 180°C selama 24 jam di dalam *Oven* (Memmert UN30, Jerman). Setelah 24 jam oven dibiarkan dingin sampai mencapai suhu ruang lalu *autoclave* diambil, larutan WO₃ dicuci dengan air menggunakan corong *buchner* beberapa kali dan dikeringkan pada temperatur 100°C selama 12 jam.

2.3. Karakterisasi Katalis dan Analisis COD serta Warna Pada POME

Karakterisasi katalis penting untuk mempelajari struktur material, termasuk morfologi dan analisis fisik-kimia. Dalam penelitian ini, karakterisasi dilakukan menggunakan *X-ray diffraction* (XRD, Bruker D2 PHASER, Jerman) untuk menentukan struktur kristal material dan isoterm fisisorpsi nitrogen (Nova Touch LUX 4, USA) untuk menentukan klasifikasi pori dan luas permukaan dari fotokatalis.

2.4. Uji Aktivitas Fotokatalis untuk Degradasi Limbah POME

Pertama katalis yang telah disintesis ditimbang sebanyak 0,5 gram lalu dilarutkan ke dalam 12,5 mL POME yang telah disaring untuk memisahkan padatan-padatan yang terdapat di dalamnya. Selanjutnya disonikasi (Hwashin Ultrasonic, Power Sonic 410) selama 45 menit. Larutan yang telah disonikasi selanjutnya dilakukan penjenjuran gas oksigen (≥99%, CV Sangkuriang) 100 mL/menit selama 30 menit agar mencapai kondisi setimbang. Setelah setimbang, *chiller* yang berfungsi sebagai pendingin air *input-output* pada reaktor dan lampu xenon 500 W dinyalakan selama 180 menit dan dilakukan pengambilan sampel setiap 30 menit. Sampel POME diambil dari sistem fotoreaktor setiap 30 menit menggunakan *syringe disposable* 10 mL dengan *syringe filter* (ukuran 0,22 µm). Sebanyak 2,5 mL

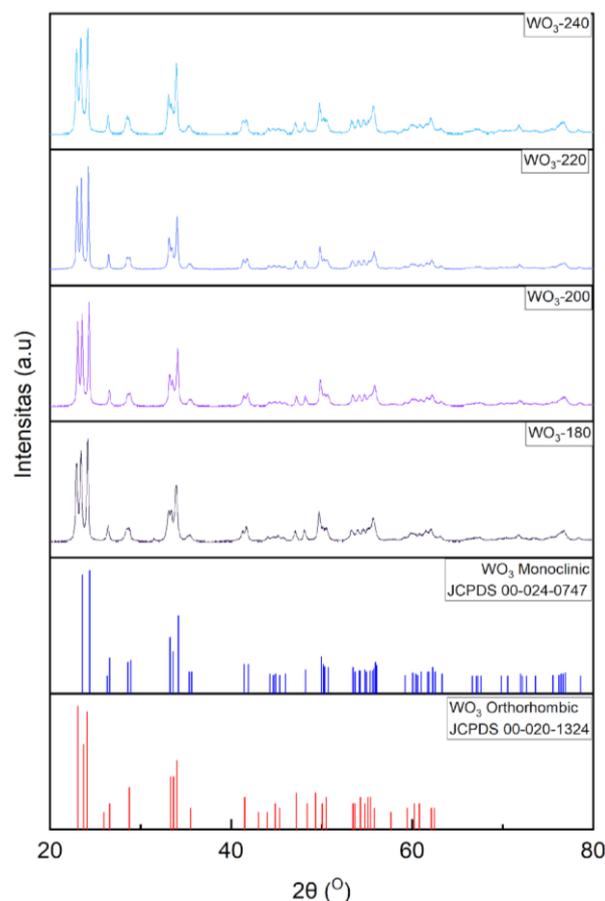
sampel yang telah difiltrasi dimasukkan ke dalam tabung reaksi yang berisi pelarut dan kemudian dipanaskan pada temperatur 150°C selama 2 jam menggunakan *Thermostat Hach DRB-200 COD*. Sampel kemudian didinginkan hingga temperatur ruang sebelum dianalisis absorbansinya menggunakan spektrofotometer ganda (Shimadzu 1800, Jepang) pada panjang gelombang 550 – 650 nm. Analisis COD ini mengikuti prosedur SNI 6989:2019. Selain itu pengujian warna POME dilakukan berdasarkan SNI 6989.80:2011 tentang Air dan Air Limbah dengan metode spektrofotometri. Kurva kalibrasi ditentukan dengan mengencerkan larutan induk 500 PtCo ke berbagai konsentrasi dan mengukur absorbansi POME yang telah difiltrasi pada panjang gelombang 400 nm.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Katalis

3.1.1. X-Ray Diffraction

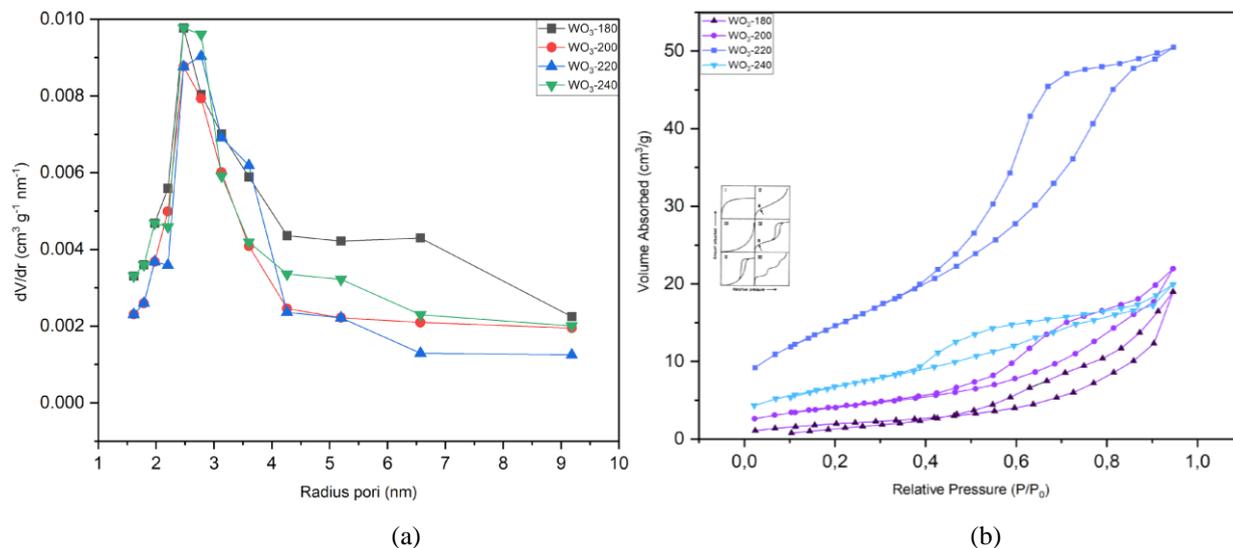
Karakterisasi XRD bertujuan untuk menentukan struktur kristal dan senyawa penyusun dari sebuah fotokatalis. Hasil karakterisasi XRD WO₃ yang disintesis dari prekursor Na₂WO₄·2H₂O dengan proses hidrotermal ditunjukkan pada Gambar 2 kemudian dicocokkan dengan *database JCPDS International Center of Diffraction Data* menggunakan *software X'pert Highscore*. Dari sini diketahui bahwa jenis struktur kristal untuk WO₃ adalah *orthorhombic* dan *monoclinic* ditunjukkan oleh Gambar 2. Fasa *orthorhombic* teridentifikasi dengan munculnya puncak difraksi pada $2\theta = 23,08^\circ, 23,70^\circ, 24,09^\circ, \text{ dan } 25,95^\circ$, yang menunjukkan bidang kristal (001), (020), (200), dan (011) dari struktur *orthorhombic* (JCPDS 00-020-1324) (Roth, 1966). Fasa *monoclinic* teridentifikasi dengan munculnya puncak difraksi pada $2\theta = 23,58^\circ, 24,28^\circ, 26,31^\circ, \text{ dan } 26,59^\circ$, yang menunjukkan bidang kristal (020), (200), (021), dan (120) dari struktur *monoclinic* (JCPDS 00-024-0747) (Smith, 1973). Adapun persentase kristalin yang diperoleh berdasarkan analisis tersebut pada variasi temperatur 180, 200, 220, dan 240°C secara berturut-turut adalah 78,6%, 78,9%, 80,2%, 78,1%. Berdasarkan hasil XRD, temperatur 200 dan 220°C menghasilkan persentase kristalinitas WO₃ lebih besar daripada variasi temperatur lainnya. Pada suhu yang terlalu rendah, seperti 180°C, energi termal yang tersedia mungkin tidak cukup untuk mendorong pembentukan kristal yang teratur. Akibatnya, persentase kristalinitas lebih rendah karena fase amorf atau partikel yang kurang teratur lebih dominan. Pada suhu menengah seperti 200°C dan 220°C, energi termal yang tersedia optimal untuk pembentukan kristal yang teratur, sehingga persentase kristalinitas meningkat (Zhang dkk., 2018).



Gambar 2. Pola XRD pada Variasi Temperatur Sintesis Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

3.1.2. Isoterm Adsorpsi-Desorpsi Nitrogen

Analisis isoterm adsorpsi-desorpsi N₂ bertujuan untuk menentukan kurva isoterm, ukuran pori distribusi, luas permukaan, volume pori, dan radius pori. Gambar 3 menunjukkan kurva isoterm dari WO₃ yang telah disintesis pada berbagai variasi temperatur. Berdasarkan klasifikasi IUPAC, kurva adsorpsi pada Gambar 3 (a) dan (b) menunjukkan adanya mesopori (2-50 nm) dengan tipe V, yang ditandai dengan peningkatan volume adsorpsi yang tajam pada temperatur tinggi tekanan relatif (P/P₀ ~1) (Shang dkk., 2012). Kurva ini juga menampilkan *loop histeresis* H1 yang khas, yang terkait dengan pori-pori silinder yang seragam atau struktur menyerupai kapsul (Lv dkk., 2011).



Gambar 3 (a) Kurva Distribusi Jari-jari Pori dan (b) Kurva Isoterm Fisisorpsi Nitrogen pada Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Luas permukaannya adalah diukur menggunakan metode Brunauer–Emmett–Teller (BET), dan volume pori serta pori rata-rata radius dihitung menggunakan metode Barrett-Joyner-Halenda (BJH). Tabel 1 menyajikan rekapitulasi data luas permukaan, volume pori, dan rata-rata jari-jari pori untuk fotokatalis WO₃ pada berbagai temperatur sintesis.

Tabel 1. Rekapitulasi Luas Permukaan, Volume Pori, dan Rata-Rata Jari-Jari Pori Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Fotokatalis	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (cm ³ /g)	Rata-rata Jari-jari Pori (nm)
WO ₃ -180	14,01	0,03	1,5
WO ₃ -200	23,98	0,04	1,6
WO ₃ -220	40,08	0,06	2,0
WO ₃ -240	17,4	0,04	1,8

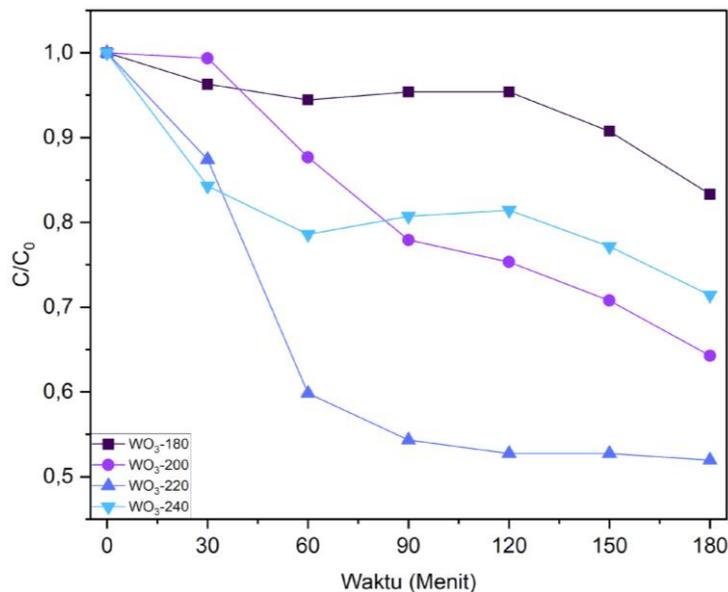
Data Tabel 1 dapat dilihat bahwa luas permukaan, volume pori, dan rata-rata jari-jari pori fotokatalis WO₃ mengalami variasi yang signifikan tergantung pada temperatur pemanasan. Pada temperatur 180 °C, luas permukaan adalah 14,01 m²/g dengan volume pori 0,03 cm³/g dan jari-jari pori rata-rata 1,5 nm. Saat temperatur pemanasan meningkat menjadi 200°C, luas permukaan meningkat menjadi 23,98 m²/g, volume pori menjadi 0,04 cm³/g, dan jari-jari pori rata-rata sedikit bertambah menjadi 1,6 nm. Kondisi optimal tampak pada temperatur 220°C, di mana luas permukaan mencapai 40,08 m²/g, volume pori 0,06 cm³/g, dan jari-jari pori 2,0 nm, menunjukkan peningkatan signifikan dalam struktur pori yang lebih terbuka. Namun, pada temperatur 240°C, terjadi penurunan luas permukaan menjadi 17,4 m²/g, volume pori kembali menurun menjadi 0,04 cm³/g, dan jari-jari pori rata-rata berkurang menjadi 1,8 nm, kemungkinan disebabkan oleh proses *sintering* atau aglomerasi partikel (Qin dkk., 2017). Dengan demikian, temperatur pemanasan mempengaruhi karakteristik fisik WO₃, di mana temperatur 220 °C menghasilkan sifat optimal untuk aplikasi fotokatalitik, sedangkan temperatur yang lebih tinggi dapat menurunkan efisiensi karena perubahan struktural.

3.2. Uji Aktivitas Katalis`

3.2.1. Penurunan Parameter COD pada Limbah POME

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah parameter yang mengukur jumlah oksigen terlarut yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air limbah secara kimiawi. Prosedur pengukuran COD mengikuti regulasi

yang ditetapkan oleh pemerintah melalui SNI 6989.2:2019. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, performa degradasi keempat fotokatalis WO₃ yang telah disintesis dapat dilihat pada Gambar 4.

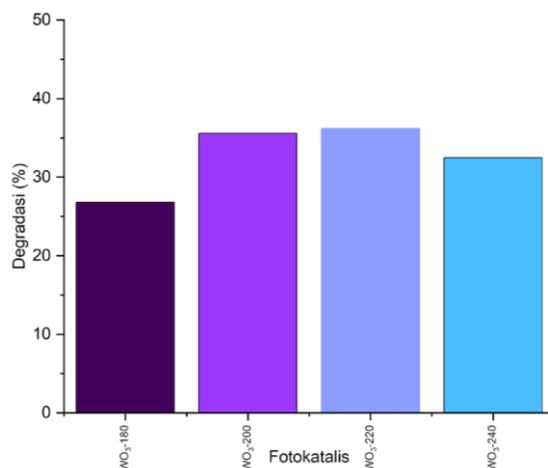


Gambar 4. Hasil Uji Aktivitas Fotokatalitik COD menggunakan Katalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Sintesis Hidrotermal.

Pada Gambar 4 terlihat bahwa temperatur sintesis mempengaruhi kinerja fotokatalis. Pada penelitian ini fotokatalis WO₃ yang disintesis pada temperatur 180, 200, 220, dan 240°C, memperoleh hasil yang menarik. Secara berturut-turut tingkat degradasi yang dicapai adalah masing-masing 16,67%, 35,72%, 48,05% dan 28,58%. Pada temperatur 180°C, kinerja fotokatalis rendah, disebabkan oleh luas permukaan dan volume pori yang kecil (Jiang dkk., 2023) Peningkatan temperatur hingga 200 °C dan 220°C menunjukkan peningkatan signifikan dalam kinerja, dengan temperatur 220 °C memberikan hasil terbaik. Hal ini berkaitan dengan luas permukaan dan volume pori yang maksimal, meningkatkan jumlah permukaan aktif untuk reaksi fotokatalitik (Amadine dkk., 2017; H. Cheng dkk., 2014). Namun, pada temperatur 240°C, kinerja fotokatalis menurun, diduga akibat sintering yang menyebabkan aglomerasi partikel dan penurunan luas permukaan serta volume pori (Qin dkk., 2017). Dengan demikian, temperatur sintesis optimal untuk WO₃ adalah 220°C, di mana kinerja fotokatalitik mencapai puncaknya. Selain luas permukaan dan volume pori, kristalinitas katalis juga berpengaruh langsung terhadap efisiensi degradasi polutan. Katalis dengan kristalinitas tinggi memiliki struktur yang teratur, memudahkan pergerakan dan pemisahan pasangan elektron-hole yang dihasilkan saat terpapar cahaya. Pemisahan yang efektif ini mengurangi rekombinasi pasangan elektron-hole, sehingga meningkatkan interaksi dengan polutan dan mempercepat degradasi (Zhang dkk., 2018).

3.2.2. Penurunan Parameter Warna pada Limbah POME

Palm Oil Mill Effluent (POME) memiliki karakteristik visual berupa warna coklat, konsistensi kental, dan bau yang tajam. Gambar 5 menunjukkan efek temperatur sintesis terhadap penurunan warna dalam POME. Temperatur sintesis WO₃ sangat mempengaruhi kinerja fotokatalis, Penggunaan katalis yang tepat dan dalam konsentrasi yang optimal dapat mempercepat proses degradasi bahan organik dan meningkatkan kualitas air hasil pengolahan limbah tersebut (Ameta dkk., 2013). Perubahan warna pada POME dipantau selama proses, dengan harapan warna tersebut sesuai akan menjadi lebih jelas seiring berjalannya waktu. Adapun perubahan warna dapat ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil menunjukkan bahwa performa terbaik terdapat pada fotokatalis WO₃-220 dengan persentase 36,22%.



Gambar 5. Persentase Degradasi Warna Limbah POME setelah Waktu Reaksi 3 Jam menggunakan Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Peningkatan temperatur sintesis memberikan beberapa manfaat yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi degradasi. Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan kristalinitas dan interaksi antara partikel, menghasilkan struktur yang lebih teratur dan homogen (Xu dkk., 2017). Hal ini memungkinkan terbentuknya lebih banyak area aktif pada permukaan fotokatalis, yang penting untuk reaksi fotokatalitik degradasi limbah POME.

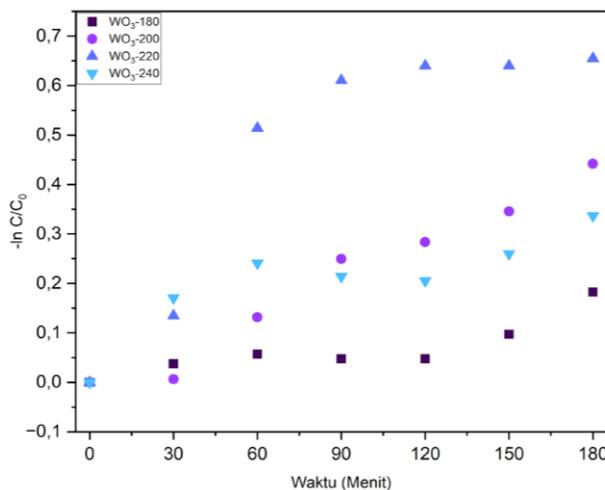
3.2.3. Analisa Konstanta Kinetika Degradasi Limbah POME

Berdasarkan data degradasi kandungan organik (COD) dan perubahan warna, kinetika reaksi penurunan dapat dianalisis. Terdapat tiga pendekatan umum untuk menentukan kinetika reaksi, yaitu Langmuir-Hinshelwood (L-H), Eley-Rideal (ER), dan Mars Van Krevelen (MVK). Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan L-H dengan asumsi bahwa reaksi terjadi di permukaan katalis, melibatkan proses adsorpsi dan desorpsi dua reaktan. Selain itu, reaksi diasumsikan mengikuti model kuasi orde pertama, dengan satu reaktan (oksigen) dalam kondisi jenuh, sehingga hanya perubahan konsentrasi senyawa organik yang dianalisis melalui perubahan COD dan warna. Dengan asumsi ini, kinetika reaksi dapat diekspresikan dalam bentuk Persamaan 1 dan 2.

$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (1)$$

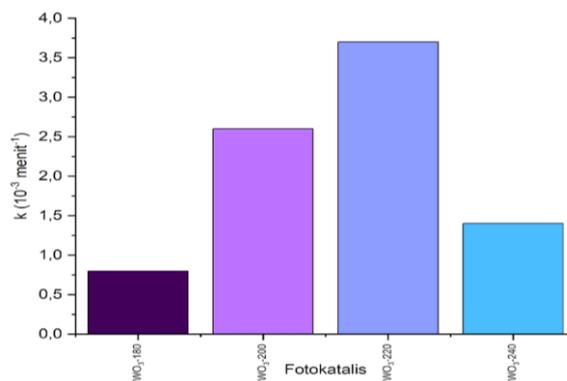
$$-\ln \frac{C_0}{C} = kt \quad (2)$$

Untuk menentukan konstanta laju reaksi (k), dilakukan plot linear antara $\ln(C_0/C)$ terhadap waktu (t), di mana k merupakan kemiringan dari plot linear tersebut. Analisis ini memberikan pemahaman tentang kinetika degradasi penggunaan POME fotokatalis WO₃ pada berbagai temperatur sintesis seperti yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva Kinetika Degradasi COD menggunakan Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Gambar 6 menunjukkan laju degradasi COD dari fotokatalis WO₃ yang disintesis pada berbagai temperatur pemanasan: 180, 200, 220, dan 240°C. Fotokatalis yang disintesis pada temperatur 200°C dan 220°C menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan temperatur lainnya. Pada temperatur 200°C, degradasi COD meningkat secara konsisten seiring waktu, mencapai nilai $-\ln C/C_0$ 0,44 setelah 180 menit. Sementara itu, fotokatalis pada temperatur 220°C menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai $-\ln C/C_0$ 0,65 setelah 180 menit, menunjukkan aktivitas fotokatalitik tertinggi, hal ini disebabkan oleh luas permukaan dan volume pori yang optimal yang menyediakan lebih banyak permukaan aktif untuk reaksi (Amadine dkk., 2017). Sebaliknya, fotokatalis yang disintesis pada temperatur 180°C menunjukkan kinerja terendah dengan nilai $-\ln C/C_0$ hanya sekitar 0,18 setelah 180 menit, hal ini dikarenakan luas permukaan dan volume pori yang kecil (H. Cheng dkk., 2014). Fotokatalis pada temperatur 240°C juga menunjukkan penurunan kinerja, dengan nilai $-\ln C/C_0$ sekitar 0,33 setelah 180 menit, yang mungkin disebabkan oleh proses *sintering* pada temperatur tinggi yang menyebabkan aglomerasi partikel dan mengurangi luas permukaan spesifik serta jumlah permukaan aktif (Qin dkk., 2017). Secara keseluruhan, temperatur sintesis optimal untuk fotokatalis WO₃ adalah 220 °C, dimana luas permukaan dan volume pori berada pada kondisi yang paling menguntungkan untuk reaksi fotokatalitik (Zhu dkk., 2017). Nilai konstanta laju reaksi (k) untuk COD ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Konstanta Laju Reaksi untuk Degradasi COD menggunakan Fotokatalis WO₃ dengan Variasi Temperatur Hidrotermal

Dari Gambar 7, dapat dilihat bahwa untuk nilai k untuk COD (*Chemical Oxygen Demand*) dari fotokatalis WO₃ yang diperoleh dari variasi temperatur sintesis memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi degradasi COD. Pada temperatur 180°C, nilai k adalah $0,8 \times 10^{-3}$ menit⁻¹, pada saat temperatur sintesis dinaikkan menjadi 200°C nilai k yang diperoleh juga meningkat menjadi $2,6 \times 10^{-3}$ menit⁻¹. Puncaknya adalah pada temperatur sintesis 220°C dimana nilai k tertinggi diperoleh yaitu $3,7 \times 10^{-3}$ menit⁻¹, sedangkan pada temperatur 240°C nilai k berkurang menjadi $1,4 \times 10^{-3}$ menit⁻¹. Hal ini sejajar dengan hasil karakterisasi serta hasil uji degradasi untuk COD dan warna bahwa pada temperatur 200 dan 220°C memiliki hasil terbaik. Berdasarkan penelitian yang telah diperoleh kemudian dapat ditabulasikan perbandingan kinetika degradasi antara penelitian ini dengan beberapa penelitian yang telah dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Perbandingan Hasil Penelitian dalam Pengembangan Fotokatalis untuk Degradasi Limbah POME

Fotokatalis	Konsentrasi Fotokatalis (g/L)	Celah Pita (eV)	Sumber Sinar	Waktu Reaksi (Menit)	Penurunan COD (%)	Penurunan Warna (%)	Konstanta kinetika laju reaksi (menit ⁻¹)	Referensi
WO ₃	1,0	-	Xenon 500 W	180	48,05	36,22	$3,7 \times 10^{-3}$	Penelitian ini
WO ₃ / g-C ₃ N ₄	1,0	2,80	Xenon 100 W	420	17,00	30,00	$2,4 \times 10^{-3}$	(Razali dkk., 2022)
Ag/ TiO ₂	1,5	2,69	UV-Vis	480	26,77	-	$6,61 \times 10^{-4}$	(Ng dkk., 2016)
3LaCa	3,0	3,10	UV-Vis	240	54,00	-	$3,6 \times 10^{-3}$	(Shariah Ghazali dkk., 2019)
Pt/TiO ₂	0,2	3,16	UV 100 W	80	11,00	-	$1,34 \times 10^{-3}$	(C. K. Cheng dkk., 2015)
WO ₃	1,0	3,20	UV-Vis	240	48,00	51,15		(Aqilah dkk., 2021)
BiVO ₄	1,0	2,50	Xenon 300 W	240	47,00	-	$1,04 \times 10^{-3}$	(Saputera dkk., 2021)

Efisiensi fotokatalitik sangat bergantung pada sifat elektrik material, terutama celah pita (*band gap*) dan kemampuan pemisahan muatan (*electron-hole separation*). Berdasarkan data pada tabel terdapat dua aspek penting yang dapat dikaitkan dengan kinerja katalis yaitu:

a. Celah Pita dan Penyerapan Cahaya:

WO₃ (3,20 eV) dan TiO₂ (3,16 eV) hanya dapat diaktifkan dalam rentang UV, sehingga sistem berbasis UV-Vis menunjukkan performa yang baik dalam degradasi COD, sedangkan untuk WO₃/g-C₃N₄ (2,80 eV) dan BiVO₄ (2,50 eV) memiliki celah pita lebih kecil, sehingga dapat menyerap lebih banyak cahaya tampak. Namun, penurunan COD pada WO₃/g-C₃N₄ relatif rendah (17%) dibandingkan WO₃ murni, yang dapat disebabkan oleh tingkat rekombinasi elektron-hole yang masih cukup tinggi (Razali dkk., 2022).

b. Modifikasi dengan Logam Mulia dan Oksida Lain:

Ag/TiO₂ dan Pt/TiO₂ menunjukkan konstanta kinetika (*k*) yang lebih rendah dibandingkan WO₃, meskipun Pt dan Ag biasanya dapat meningkatkan efisiensi pemisahan muatan. Menurut Cheng dkk (2017), hal ini mungkin disebabkan oleh perbedaan sumber cahaya dan intensitasnya.

Sementara itu konsentrasi katalis mempengaruhi jumlah situs aktif yang tersedia untuk reaksi fotokatalitik. Namun, ada batas optimal di mana peningkatan konsentrasi katalis dapat menurunkan efisiensi karena *scattering* cahaya dan penggumpalan partikel (Wang dkk., 2021). Katalis Pt/TiO₂ (0,2 g/L) memiliki efisiensi degradasi COD rendah (11%), dikarenakan jumlah situs aktif yang terlalu sedikit (Cheng dkk., 2015) sedangkan WO₃ (1,0 g/L) dalam penelitian ini menunjukkan efisiensi tinggi (48,05%), menunjukkan bahwa konsentrasi ini cukup optimal untuk sistem fotokatalitik dengan lampu Xenon 500 W. Meskipun Pt/TiO₂ dikenal memiliki efisiensi pemisahan muatan yang baik karena keberadaan logam mulia (*platinum*), efisiensinya tergantung pada sumber cahaya yang digunakan (Cheng dkk., 2015)

Pada penelitian ini, WO₃ diaktifkan menggunakan lampu Xenon 500 W, yang memancarkan spektrum cahaya yang lebih luas, termasuk cahaya tampak. Sementara itu, Pt/TiO₂ hanya menggunakan UV 100 W, yang mungkin membatasi efektivitas katalis tersebut.

Kesimpulan

Penggunaan WO₃ untuk mendegradasi limbah POME belum banyak dieksplorasi, meskipun memiliki potensi besar sebagai fotokatalis untuk aplikasi ini. Penelitian ini membuktikan bahwa semikonduktor WO₃ dapat disintesis dengan sukses melalui metode hidrotermal pada variasi temperatur 180, 200, 220, dan 240 °C. Hasil karakterisasi menunjukkan pembentukan struktur kristal *orthorhombic* dan *monoclinic* serta klasifikasi mesopori (Tipe V). Uji aktivitas fotokatalitik menunjukkan bahwa WO₃ yang disintesis pada temperatur 220 °C dengan konsentrasi katalis 1gr/L dengan menggunakan lampu Xenon 500W memiliki efisiensi degradasi tertinggi. Fotokatalis ini mampu mengurangi COD 48,05%, warna 36,22% dengan nilai konstanta laju reaksi (*k*) pengurangan COD sebesar $3,7 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Temuan ini menunjukkan potensi besar WO₃ sebagai fotokatalis dalam mendegradasi limbah POME, yang dapat menjadi solusi yang berharga dalam pengelolaan lingkungan.

Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan performa fotokatalis WO₃ yang lebih baik, yaitu:

- Modifikasi material katalis: mengingat potensi WO₃ yang tinggi, penambahan material lain seperti TiO₂, atau doping dengan logam transisi atau non-logam, dapat dilakukan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan memperluas spektrum penyerapan cahaya hingga area cahaya tampak.
- Optimasi parameter proses: meskipun penelitian ini menunjukkan hasil yang optimum pada suhu 220°C, diperlukan studi lebih lanjut untuk mengoptimalkan parameter lain seperti pH larutan, intensitas cahaya, dan waktu kontak.
- Menggunakan sumber cahaya yang berbeda: penggunaan lampu xenon pada penelitian ini memberikan hasil yang baik, namun perlu dieksplorasi potensi sumber cahaya lain yang lebih ramah lingkungan.

Daftar Notasi

C = Konsentrasi warna pada waktu t menit [mg/L]

C₀ = Konsentrasi warna pada t = 0 [mg/L]

k = Konstanta laju reaksi [menit⁻¹]

Daftar Pustaka

- Amadine, O., Essamlali, Y., Fihri, A., Larzek, M., & Zahouily, M. (2017). Effect of calcination temperature on the structure and catalytic performance of copper-ceria mixed oxide catalysts in phenol hydroxylation. *RSC Advances*, 7(21), 12586–12597. <https://doi.org/10.1039/c7ra00734e>
- Ameta, R., Benjamin, S., Ameta, A., & Ameta, S. C. (2013). Photocatalytic degradation of organic pollutants: A review. *Materials Science Forum*, 734, 247–272. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.734.247>

- Aqilah, N., Razali, M., Norharyati, W., Salleh, W., Rosman, N., & Hafiza, N. (2021). Materials Today : Proceedings Palm oil mill effluent treatment using tungsten trioxide: Adsorption and photocatalytic degradation. *Materials Today: Proceedings*, 42, 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.424>
- Cheng, C. K., Rizauddin Derahman, M., & Khan, M. R. (2015). Evaluation of the photocatalytic degradation of pre-treated palm oil mill effluent (POME) over Pt-loaded titania. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.10.016>
- Cheng, H., Wang, J., Zhao, Y., & Han, X. (2014). Effect of phase composition, morphology, and specific surface area on the photocatalytic activity of TiO₂ nanomaterials. *RSC Advances*, 4(87), 47031–47038. <https://doi.org/10.1039/c4ra05509h>
- Fakhri, A., & Behrouz, S. (2015). Photocatalytic properties of tungsten trioxide (WO₃) nanoparticles for degradation of Lidocaine under visible and sunlight irradiation. *Solar Energy*, 112, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.11.014>
- Jiang, S., You, Z., & Tang, N. (2023). Effects of Calcination Temperature and Calcination Atmosphere on the Performance of CO₃O₄ Catalysts for the Catalytic Oxidation of Toluene. *Processes*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/pr11072087>
- Lv, K., Li, J., Qing, X., Li, W., & Chen, Q. (2011). Synthesis and photo-degradation application of WO₃/TiO₂ hollow spheres. *Journal of Hazardous Materials*, 189(1–2), 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.02.038>
- Ng, K. H., Lee, C. H., Khan, M. R., & Cheng, C. K. (2016). Photocatalytic degradation of recalcitrant POME waste by using silver doped titania: Photokinetics and scavenging studies. *Chemical Engineering Journal*, 286, 282–290. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.072>
- Prabhu, S., Cindrella, L., Kwon, O. J., & Mohanraju, K. (2018). Photoelectrochemical and photocatalytic activity of TiO₂-WO₃ heterostructures boosted by mutual interaction. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 88(June), 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.07.028>
- Putri, R. M., Almunadya, N. S., Amri, A. F., Afnan, N. T., Nurachman, Z., Devianto, H., & Saputera, W. H. (2022). Structural Characterization of Polycrystalline Titania Nanoparticles on C. striata Biosilica for Photocatalytic POME Degradation. *ACS Omega*, 7(48), 44047–44056. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05450>
- Qin, Y., Xun, S., Zhan, L., Lu, Q., He, M., Jiang, W., Li, H., Zhang, M., Zhu, W., & Li, H. (2017). Synthesis of mesoporous WO₃/TiO₂ catalyst and its excellent catalytic performance for the oxidation of dibenzothiophene. *New Journal of Chemistry*, 41(2), 569–578. <https://doi.org/10.1039/c6nj02503j>
- Razali, N. A. M., Salleh, W. N. W., Aziz, F., Jye, L. W., Yusof, N., Jaafar, J., & Ismail, A. F. (2022). Influence of g-C₃N₄ and PANI onto WO₃ photocatalyst on the photocatalytic degradation of POME. *Materials Today: Proceedings*, 65, 3054–3059. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.118>
- Saputera, W. H., Amri, A. F., Mukti, R. R., Suendo, V., Devianto, H., & Sasongko, D. (2021). Photocatalytic degradation of palm oil mill effluent (Pome) waste using bivo4 based catalysts. *Molecules*, 26(20). <https://doi.org/10.3390/molecules26206225>
- Shang, X., Hu, G., He, C., Zhao, J., Zhang, F., Xu, Y., Zhang, Y., Li, J., & Chen, J. (2012). Regeneration of full-scale commercial honeycomb monolith catalyst (V₂O₅-WO₃/TiO₂) used in coal-fired power plant. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(1), 513–519. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.070>
- Shariah Ghazali, S., Jusoh, R., & Haslinda Shariffuddin, J. (2019). Parameter Affecting Photocatalytic Degradation of POME using LaCa as Photocatalyst. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1173–1182. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.120>
- Wang, Q., Zhang, W., Hu, X., Xu, L., Chen, G., & Li, X. (2021). Hollow spherical WO₃/TiO₂ heterojunction for enhancing photocatalytic performance in visible-light. *Journal of Water Process Engineering*, 40(July 2020), 101943. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101943>
- Xu, T., Wang, Y., Zhou, X., Zheng, X., Xu, Q., Chen, Z., Ren, Y., & Yan, B. (2017). Fabrication and assembly of two-dimensional TiO₂/WO₃-H₂O heterostructures with type II band alignment for enhanced photocatalytic performance. *Applied Surface Science*, 403, 564–571. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.242>
- Zhu, X., Zhang, P., Li, B., Hu, Q., Su, W., Dong, L., & Wang, F. (2017). Preparation, characterization and photocatalytic properties of La/WO₃ composites. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(16), 12158–12167. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7030-3>