



# Pengolahan Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) Menggunakan Katalis ZnO dengan Penambahan CU untuk Meningkatkan Kinerja Fotokatalitik

Ferdika Nanda Maulana<sup>1\*</sup>, Selastia Yuliati<sup>2</sup>, Yuniar<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

\*Penulis Korespondensi: [yuniar@polsri.ac.id](mailto:yuniar@polsri.ac.id) <sup>1</sup>

**Abstract.** Over time, the yield of oil palm had continued to increase each year, which was followed by a rise in the amount of waste produced. One of the main wastes from palm oil processing was liquid waste, commonly known as Palm Oil Mill Effluent (POME). This study aimed to obtain a ZnO/Cu catalyst and to determine the optimal catalyst weight and irradiation time to reduce COD, TSS, and pH values. The ZnO/Cu catalyst was synthesized using the co-precipitation method and was applied through a photocatalytic process, which utilized catalysts and ultraviolet (UV) light. The catalyst was applied to POME with ZnO weight variations of 100 mg, 150 mg, and 200 mg, and UV irradiation times of 30, 60, 90, 120, and 150 minutes. The best result was obtained at a catalyst weight of 200 mg and an irradiation time of 150 minutes, resulting in COD of 216 mg/L, TSS of 20.00 mg/L, and pH of 7.39, which met the wastewater quality standards.

**Keywords:** COD; Photocatalysis; pH; Synthesis; TSS.

**Abstrak.** Seiring berjalannya waktu hasil panen kelapa sawit semakin meningkat setiap tahunnya, yang disertai juga peningkatan limbah yang dihasilkan. Limbah dari kelapa sawit adalah limbah cair atau yang dikenal dengan palm oil mill effluent (POME), Penelitian ini bertujuan mendapatkan katalis ZnO/Cu dan menentukan berat serta waktu optimal untuk menurunkan nilai COD, TSS, dan pH. Katalis ZnO/Cu disintesis dengan metode kopresipitasi dan diaplikasikan melalui proses fotokatalitik dimana teknologi yang memanfaatkan katalis dan cahaya sinar Ultraviolet (UV). Pengaplikasian Katalis ZnO/Cu terhadap limbah POME dengan variasi berat ZnO yaitu 100mg 150mg dan 200mg serta waktu penyinaran 30,60,90,120 dan 150 menit. Dari sampel yang ada hasil terbaik diperoleh pada berat 200 mg dan waktu penyinaran 150 menit dengan COD 216 mg/l, TSS 20,00 mg/l, dan pH 7,39 yang memenuhi baku mutu.

**Kata kunci:** COD; Fotokatalisis; pH; Sintesis; TSS.

## 1. LATAR BELAKANG

Limbah cair yang dihasilkan dari proses pengolahan minyak kelapa sawit, yang dikenal sebagai *Palm Oil Mill Effluent* (POME), menjadi salah satu masalah besar dalam industri kelapa sawit. POME mengandung senyawa organik dan unsur-unsur berbahaya, seperti Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS), Nilai pH yang asam ,minyak dan lemak, bahan organik terlarut, dan padatan tersuspensi yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Setiap tahun, jutaan ton POME dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit di seluruh dunia, dan tanpa pengolahan yang tepat, limbah ini dapat menyebabkan pencemaran air, tanah, dan udara, yang berdampak negatif pada kesehatan manusia dan ekosistem. (Saputera, 2021)

Limbah POME memiliki potensi besar untuk merusak lingkungan karena tingginya kadar Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD) dan Total Suspended Solid (TSS). Secara rata-rata, POME di Indonesia memiliki nilai COD antara 15.000 hingga 100.000 mg/L, BOD antara 10.250 hingga 100.000 mg/L dan TSS sekitar 18.000-

50.000 mg/L Berdasarkan hal ini, POME yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit tidak dapat langsung dibuang ke lingkungan, melainkan harus melalui proses pengolahan untuk mengurangi kadar COD, BOD, TSS dan pH. Pemerintah Indonesia telah mengatur batasan pembuangan limbah industri kelapa sawit melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 No. 5 Tahun 2014, yang menetapkan kadar maksimum COD, BOD, TSS dan pH yang boleh dibuang ke lingkungan yaitu 350 mg/L, 100 mg/L, 250 mg/L pH 6-9. (Wahyudi et al., 2023)

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengurangi dampak pencemaran dan polutan organik yang dihasilkan POME adalah fotokatalitik. Fotokatalitik adalah proses yang melibatkan penggunaan cahaya terutama cahaya ultraviolet (UV) untuk mengaktifkan suatu katalis, dimana proses ini yang kemudian akan mempercepat reaksi kimia untuk menguraikan polutan dalam limbah POME. ZnO (Zinc Oxide), sebagai fotokatalis semikonduktor, telah banyak digunakan dalam pengolahan limbah industri, termasuk POME. ZnO memiliki sifat semikonduktor yang baik, sehingga mampu menghasilkan radikal bebas seperti OH<sup>-</sup> dan O<sub>2</sub><sup>-</sup> yang dapat menghancurkan polutan organik dalam limbah. (Phang, 2021)

Namun, meskipun ZnO memiliki potensi yang besar sebagai fotokatalis, kinerjanya dapat terbatas, terutama dalam hal efisiensi energi dan stabilitas jangka panjang. Untuk meningkatkan kinerja fotokatalitik ZnO, salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah dengan penambahan logam. Salah satu logam yang sering digunakan untuk penambahan pada ZnO adalah tembaga (Cu). Penambahan Cu dalam ZnO bertujuan untuk memperbaiki sifat semikonduktor ZnO, memperpanjang umur pembawa muatan, dan meningkatkan efisiensi fotokatalitiknya.

Menurut penelitian Radityo M Rangkuti dkk, Tahun 2018, menjelaskan bahwa penambahan Cu dengan konsentrasi 4% memberikan hasil terbaik, di mana fase ZnO yang terbentuk memiliki persentase mencapai 64,7%. Selain itu, ukuran rata-rata partikel pada konsentrasi ini sekitar 35 nm. penambahan Cu 4% dianggap paling efektif berdasarkan karakterisasi ukuran partikel dan kestabilannya yang dihasilkan. Penambahan Cu dalam ZnO menunjukkan bahwa Cu dapat mengubah struktur elektronik ZnO, yang mengarah pada peningkatan efisiensi dalam proses fotokatalisis. Selain itu, konsentrasi penambahan Cu dapat mempengaruhi sifat-sifat ZnO, seperti ukuran kristal, yang berperan dalam proses degradasi polutan. Oleh karena itu, studi tentang pengaruh penambahan Cu pada ZnO untuk pemurnian POME menjadi sangat penting, karena dapat menghasilkan material fotokatalitik yang lebih efektif dalam menguraikan polutan yang ada dalam POME. (Rangkuti <sup>1</sup> et al., 2018)

Pengolahan air limbah POME dengan menggunakan fotokatalis ZnO yang dialkukan penambahan Cu memiliki potensi untuk menjadi solusi ramah lingkungan dan efektif dalam mengurangi polutan yang dihasilkan oleh industri kelapa sawit. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari sintesis dan karakterisasi nanopartikel ZnO dengan penambahan Cu dengan metode kopresipitasi, serta mengevaluasi kinerjanya dalam fotokatalisis untuk pemurnian limbah POME. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih ramah lingkungan dan efisien. (Saputera, 2021)

## 2. KAJIAN TEORITIS

### **Palm Oil Mill Effluent (POME)**

Palm Oil Mill Effluent (POME) adalah limbah cair yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit di pabrik. Limbah ini terdiri dari air yang mengandung sisa-sisa minyak, pati, serat, serta bahan kimia yang digunakan dalam proses pemurnian minyak kelapa sawit. POME memiliki kandungan zat organik yang tinggi, seperti Chemical Oxygen Demand (COD) dan Total Suspended Solid (TSS), yang dapat mencemari lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Limbah ini sangat sulit untuk diolah dan memiliki potensi besar untuk mencemari lingkungan, tanah, dan berdampak pada ekosistem makluk hidup jika tidak dikelola dengan baik. (Wahyudi et al., 2023)

Adapun karakteristik dari limbah cair pabrik kelapa sawit terlihat pada Tabel 2.1 Meski tak beracun, limbah cair tersebut dapat menyebabkan bencana lingkungan karena dibuang di kolam terbuka dan melepaskan sejumlah besar gas metana dan gas berbahaya lainnya yang menyebabkan emisi gas rumah kaca.

Diperkirakan 0,5-0,75 ton POME dapat diproduksi dari satu ton tandan buah kelapa sawit yang mengandung 5 kg/t bahan organik. Limbah ini, baik yang mentah maupun yang telah diolah sebagian dari industri kelapa sawit, memiliki kandungan bahan organik yang dapat terurai yang tinggi yang dapat berdampak buruk terhadap lingkungan. Karena tidak ada bahan kimia yang ditambahkan selama proses ekstraksi minyak, limbah ini dievaluasi sebagai limbah tidak beracun. Meskipun demikian, karena menipisnya DO, limbah ini dianggap sebagai salah satu polutan utama bagi kehidupan akuatik.

Oleh karena itu, sebelum dibuang ke lingkungan, limbah cair khusus ini harus diolah sesuai dengan beberapa standar departemen Sumber Daya Perminyakan, dll. Salah satu teknologi pengolahan yang dapat dilakukan yaitu memanfaatkan teknologi fotokatalitik

dimana fotokatalis ZnO dengan penambahan Cu bereaksi ketika dilakukan penyinaran UV serta menggunakan metode kopresipitasi. (Rangkuti<sup>1</sup> et al., 2018)

Banyak metode yang sudah diterapkan dalam bidang pengolahan limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) salah satunya yang telah disebutkan diatas yaitu metode sintesis kopresipitasi metode ini terkenal akan pengolahan yang ramah lingkungan, pengolahan limbah POME ini sudah seharusnya dikelola dengan baik agar tidak mencemari lingkungan dengan berbagai metode pengolahan yang ada bertujuan untuk menghasilkan limbah POME yang memiliki karakteristik yang standar aman sebelum dibuang ke lingkungan.

### **Fotokatalis ZnO dengan penambahan Cu**

Fotokatalis adalah istilah yang berasal dari gabungan kata "foto" dan "katalis," yang merujuk pada proses yang menggabungkan reaksi fotokimia dengan katalisis. Dalam proses ini, cahaya dan katalis berperan untuk mempercepat reaksi kimia yang berlangsung di permukaan katalis (Firdausi, 2020).

Ketika terkena cahaya, fotokatalis menghasilkan elektron dan hole yang dapat mempercepat reaksi redoks, mengurai zat berbahaya dalam POME tanpa perubahan permanen pada fotokatalis itu sendiri. Fotokatalis ZnO dengan penambahan Cu sendiri merupakan hasil dari sintesis dari ZnO dan Cu yang dilakukan untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik supaya bekerja yang lebih efisien. (Desinfeksi et al., 2023)

### **Seng Oksida (ZnO)**

ZnO adalah semikonduktor yang menarik untuk berbagai aplikasi karena memiliki celah pita lebar sekitar 3,37 eV pada suhu kamar, serta energi pengikatan eksiton sebesar 60 MeV. Karena sifat-sifat ini, ZnO banyak digunakan dalam berbagai perangkat, seperti dioda pemancar cahaya, sensor gas, pasta konduktif transparan, detektor sinar ultraviolet (UV), kosmetik, dan biomaterial. (Wahyudi et al., 2023)

Selain itu, penambahan Cu pada ZnO telah terbukti dapat mengubah sifat-sifat dasar material ini, sehingga meningkatkan kemampuannya untuk digunakan dalam berbagai aplikasi multifungsi, seperti fotokatalisis. Dalam konteks pengolahan limbah cair, seperti POME (Palm Oil Mill Effluent), ZnO yang dilakukan penambahan dapat berfungsi secara efektif sebagai fotokatalis untuk degradasi polutan, berkat kemampuannya dalam menyerap sinar UV dan menghasilkan spesies oksigen reaktif yang dapat mengurai kontaminan secara efisien. (Wahyudi et al., 2023)

### **Logam (Cu)**

Tembaga (Cu) adalah salah satu logam yang sangat penting dalam meningkatkan kinerja fotokatalitik dari zinc oksida (ZnO), terutama dalam aplikasi pengolahan limbah,

seperti pada limbah cair dari pabrik kelapa sawit, tembaga memiliki berbagai sifat yang sangat mendukung dan memperkuat fungsinya dalam memperbaiki kemampuan ZnO untuk melakukan fotokatalisis, Dalam penenlitian ini tembaga yang akan digunakan yaitu tembaga jenis Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O karna sifat nya yang mampu meningkatkan kinerja Zn dengan baik karena memiliki jenis masa yang dekat dengan Zn.(Maru et al., 2023)

### Sintesis ZnO dengan penambahan Cu

Pembuatan nanopartikel ZnO dengan metode kopresipitasi adalah salah satu teknik yang efisien untuk menghasilkan material semikonduktor. Dalam proses ini, Zinc Oxide (ZnO) dapat ditingkatkan dengan berbagai jenis atom lain seperti besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), dan nikel (Ni), untuk meningkatkan performa material tersebut. Tembaga (Cu), yang terletak pada posisi yang berdekatan dengan zinc (Zn) dalam tabel periodik, memiliki massa atom dan jari-jari atom yang hampir serupa, sehingga memungkinkan tembaga untuk menggantikan ion Zn<sup>2+</sup> struktur kristal ZnO secara efisien. (Rangkuti <sup>1</sup> et al., 2018)

Komponen dan struktur Katalis ZnO/Cu yang disintesis melalui metode kopresipitasi memiliki struktur aktif dengan ZnO sebagai sisi aktif utama dan ion Cu<sup>2+</sup> yang tersebar merata sebagai bahan pendukung (*support*). ZnO berfungsi sebagai pusat reaksi fotokatalitik yang menyerap cahaya dan membentuk pasangan elektron-hole, sedangkan Cu sebagai *support* membantu meningkatkan kestabilan struktur, mencegah penggumpalan partikel, serta memperluas permukaan katalis sehingga lebih banyak bagian aktif yang dapat digunakan. Keberadaan Cu juga membentuk hubungan langsung antara ZnO dan Cu yang memudahkan perpindahan elektron, mengurangi terjadinya pertemuan kembali antara elektron dan hole, serta meningkatkan pembentukan radikal aktif seperti radikal hidroksil (•OH) dan radikal superoksida (O<sub>2</sub>•<sup>-</sup>). Kerja sama antara sisi aktif ZnO, *support* Cu, luas permukaan yang besar, dan ukuran partikel yang seragam membuat katalis ini mampu memecah senyawa organik yang sulit terurai pada limbah POME dengan lebih efektif.(Abbay Gebretsadik dkket al., 2024).

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama dua bulan, yaitu Mei–Juni 2025, di Laboratorium Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya. Alat yang digunakan meliputi neraca analitik, oven, gelas kimia, erlenmeyer, labu ukur, pH meter, hot plate, magnetic stirrer, lampu UV, serta peralatan pendukung laboratorium lainnya. Bahan utama yang digunakan adalah Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·3H<sub>2</sub>O, HCl 0,5 M, NaOH 2 M, aquades, dan limbah cair Palm Oil Mill Effluent (POME).

Tahapan penelitian diawali dengan persiapan bahan baku Zn dan Cu, penentuan massa yang sesuai, kemudian sintesis ZnO dengan penambahan Cu menggunakan metode presipitasi yang melibatkan pelarutan dengan HCl, pengendapan dengan NaOH hingga pH 10, serta pengeringan pada suhu 150°C. Produk yang diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD dan FTIR. Selanjutnya, katalis ZnO-Cu diaplikasikan pada limbah POME dengan variasi berat katalis (100, 150, 200 mg) serta waktu penyinaran UV (30–150 menit).

Pengamatan dilakukan untuk menilai efektivitas degradasi limbah melalui parameter kualitas air, yaitu Chemical Oxygen Demand (COD), Total Suspended Solid (TSS), dan pH. Analisis COD dilakukan dengan metode titrasi menggunakan larutan FAS, TSS ditentukan melalui penyaringan, pengeringan, dan penimbangan residu, sedangkan pH diukur menggunakan pH meter. Hasil dari seluruh prosedur ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa katalis dan lama penyinaran terhadap penurunan pencemar dalam limbah POME sehingga dapat dibandingkan dengan standar kualitas limbah cair yang berlaku.

#### **4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

##### **Hasil**

Pada penelitian yang telah dilakukan dengan judul pengolahan limbah *palm oil mill effluent* (POME) menggunakan katalis ZnO dengan penambahan Cu untuk meningkatkan kinerja fotokatalitik. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa proses dimulai dari sintesis ZnO dengan penambahan Cu, karakterisasi katalis ZnO/Cu, pengaplikasian ZnO/Cu, hasil sintesis pada limbah POME dan analisis hasil limbah POME yang telah dilakukan pengolahan dan pengaplikasian menggunakan katalis yang telah dibuat. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu analisis menggunakan alat *fourier transform infrared* (FTIR) dan *x-ray diffraction* (XRD) untuk karakterisasi hasil ZnO dengan penambahan Cu serta analisis *chemical oxygen demand* (COD), *total suspended solid* (TSS) dan pH untuk mengetahui hasil dari pengaplikasian katalis ZnO dengan penambahan Cu melalui proses fotokatalis. Penelitian ini menggunakan katalis ZnO dengan penambahan Cu dalam tiga variasi berat, yaitu 100 mg, 150 mg, dan 200 mg. Setiap variasi katalis diuji pada durasi penyinaran sinar UV yang berbeda, yakni 30, 60, 90, 120, dan 150 menit.

Pada penelitian ini, limbah POME diperoleh dari PT. Serasan Sekundang Sawit Mas yang berlokasi di Kabupaten Muara Enim. Sebelum dilakukan proses percobaan dan pengaplikasian katalis ZnO dengan penambahan Cu, limbah POME tersebut dianalisis terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik awalnya. Hasil analisis karakteristik limbah POME disajikan pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1.** Hasil Analisis POME Awal.

Pemeriksaan	Hasil (mg/l)
COD	28902,100
BOD	10559,000
TSS	3418,182
pH	4,15
Minyak dan Lemak	10170,000

*Sumber: Balai besar laboratorium kemenkes Palembang 2025*

Karakterisasi analisis pada sampel awal limbah POME ini dilakukan sebagai bentuk perbandingan dan acuan terhadap hasil analisa limbah yang didapatkan setelah dilakukan pengolahan dan pengaplikasian katalis ZnO/Cu terhadap air POME. Pengujian nilai awal ini untuk mengetahui apakah nantinya nilai yang didapatkan setelah pengolahan dapat menurunkan nilai COD, TSS dan pH pada air limbah POME. Pengolahan dimulai dengan pembuatan katalis ZnO/Cu kemudian karakterisasi menggunakan alat FTIR dan XRD yang selanjutnya diaplikasikan ke limbah melalui proses fotokatalitik untuk menurunkan nilai COD, TSS, dan pH pada air limbah POME agar bisa memenuhi standar baku mutu air limbah. Hasil dari percobaan ini dapat dilihat pada tabel 4.2, 4.3 dan 4.4.

**Tabel 2.** Hasil Analisis COD Pada Limbah POME.

Berat Katalis ZnO/Cu (mg)	Waktu Penyinaran UV (Menit)	COD (mg/l)
100	30	672
	60	640
	90	608
	120	576
	150	544
	30	480
150	60	448
	90	416
	120	384
	150	352
	30	312
	60	291
200	90	269
	120	237
	150	216

**Tabel 3.** Hasil Analisis TSS Pada Limbah POME.

Berat Katalis ZnO / Cu (mg)	Waktu Penyinaran UV (Menit)	TSS (mg/l)
100	30	503,33
	60	460,00
	90	400,00
	120	373,33
	150	326,67
	30	376,67
150	60	253,33
	90	210,00
	120	183,33
	150	170,00
	30	150,00
200	60	93,33
	90	63,33
	120	36,67
	150	20,00

**Tabel 4.** Hasil Analisis pH Pada Limbah POME.

Berat Katalis ZnO / Cu (mg)	Waktu Penyinaran UV (Menit)	pH
100	30	7,20
	60	7,22
	90	7,23
	120	7,24
	150	7,27
	30	7,25
150	60	7,28
	90	7,30
	120	7,31
	150	7,33
	30	7,32
200	60	7,34
	90	7,35
	120	7,38
	150	7,39

## Pembahasan

Permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh aktivitas industri, khususnya industri pengolahan kelapa sawit, masih menjadi tantangan besar hingga saat ini. Limbah cair hasil proses produksi kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dikenal sebagai salah satu jenis limbah yang sulit ditangani karena karakteristiknya yang kompleks. Pada penelitian ini,

POME yang digunakan menunjukkan kadar COD dan TSS yang cukup tinggi, (Zainal & Jalani, 2020). Tingginya nilai COD dan TSS pada limbah menunjukkan kandungan organik yang sulit terurai dan berbahaya bagi lingkungan, sehingga diperlukan metode pengolahan efektif dalam penelitian ini digunakan teknologi fotokatalitik berbasis katalis ZnO/Cu. (Wahyudi et al., 2023)

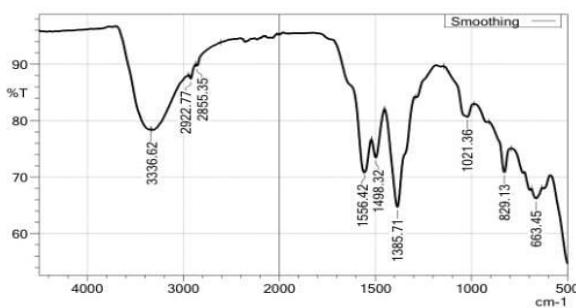
Sebelum dilakukan proses fotokatalitik, limbah POME terlebih dahulu dianalisis untuk mengetahui karakteristik awalnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa POME memiliki kandungan polutan yang sangat tinggi, dengan nilai COD sebesar 28.902,10 mg/L, BOD 10.559,00 mg/L, TSS 3.418,18 mg/L, minyak dan lemak 10.170,00 mg/L, serta pH 4,15 yang menunjukkan sifat asam. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa limbah ini memerlukan pengolahan lanjutan agar memenuhi baku mutu. Pada penelitian ini, digunakan metode fotokatalitik dengan katalis berbasis seng oksida (ZnO) yang dimodifikasi dengan penambahan tembaga (Cu) untuk menurunkan nilai COD, TSS, dan pH pada limbah POME. (Ashwin Charles1 dkk et al., 2018)

Menurut penelitian sebelumnya adriani, yuniar dkk, Tahun 2024. Menunjukkan bahwasannya dengan biokatalis ZnO dengan penambahan bahan alami mampu menurunkan nilai COD dan TSS hampir mendekati nilai baku mutu air limbah. Sedangkan pada penelitian ini yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwasannya katalis ZnO/Cu mampu secara efisien menurunkan nilai COD dan TSS pada limbah POME sampai dengan sesuai standar baku mutu air limbah yang dapat dilihat pada data hasil pengamatan pada tabel 4.1, 4.2, dan 4.3 diatas. Perbandingan diatas juga dipengaruhi oleh prosedur, bahan dan metode yang di terapkan, perbandingan yang paling signifikan yaitu antara penambahan bahan alami dengan penambahan Cu, pada penelitian sebelumnya katalis dibuat menggunakan ZnO Dan bahan alami sedangkan di penelitian ini menggunakan katalis ZnO dengan Penambahan Cu, secara umum penelitian sebelumnya dan penelitian ini sama-sama dapat menurunkan nilai COD, TSS dan pH namun secara efisen waktu, katalis ZnO/Cu pada penelitian ini lebih singkat prosesnya serta secara kimia Cu mampu berperan aktif dalam meningkatkan proses fotokatalis dalam mendegradasi polutan dalam limbah POME sehingga didapatkan hasil yang lebih baik dan sudah sesuai standar baku mutu air limbah.

### **Karakterisasi ZnO/Cu**

#### a. Hasil Karakterisasi Gugus Fungsi ZnO/Cu menggunakan FTIR

Pada Katalis ZnO/Cu yang telah dibuat maka selanjutnya dilakukan Analisis gugus fungsi senyawa yg dimana dilakukan menggunakan alat spektrofotometer FTIR. Hasil spektrum FTIR untuk ZnO/Cu dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



**Gambar 1.** Hasil Spektrum FTIR ZnO/Cu .

Sumber: Laboratorium kimia stifi bhakti pertiwi Palembang 2025

Pada Gambar 1 Hasil analisis FTIR terhadap katalis ZnO/Cu menunjukkan adanya beberapa puncak serapan yang merepresentasikan gugus fungsi penting pada material. Puncak lebar pada  $3336,62\text{ cm}^{-1}$  mengindikasikan regangan O–H (O–H stretching) yang berasal dari gugus hidroksil pada permukaan ZnO maupun molekul air yang teradsorpsi. Keberadaan gugus hidroksil ini sangat penting dalam proses fotokatalitik, karena radikal hidroksil ( $\bullet\text{OH}$ ) yang memiliki daya oksidasi tinggi terhadap polutan organik.

Pada daerah bilangan gelombang  $2922,77\text{ cm}^{-1}$  dan  $2855,35\text{ cm}^{-1}$  teramati puncak C–H stretching, baik simetris maupun asimetris, yang kemungkinan berasal dari sisa senyawa organik atau prekursor sintesis yang masih terikat pada permukaan katalis. Selanjutnya, puncak di  $1556,42\text{ cm}^{-1}$  dan  $1498,32\text{ cm}^{-1}$  diidentifikasi sebagai vibrasi C=O atau C=C, yang dapat dikaitkan dengan keberadaan senyawa karbonat atau residu organik yang teradsorpsi. Puncak pada  $1385,71\text{ cm}^{-1}$  merepresentasikan regangan simetris gugus karbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), terbentuk akibat paparan  $\text{CO}_2$  dari udara terhadap permukaan oksida logam.

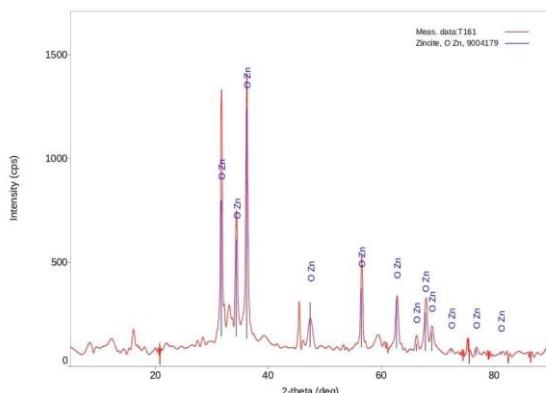
Puncak pada  $1021,36\text{ cm}^{-1}$  menunjukkan vibrasi ikatan C–O atau M–O–M (metal–oxygen–metal), yang mengindikasikan adanya keterikatan antar atom logam dan oksigen dalam struktur oksida. Sementara itu, puncak pada  $829,13\text{ cm}^{-1}$  kemungkinan berkaitan dengan bending O–H atau vibrasi anorganik lain pada permukaan. Puncak dominan pada  $663,45\text{ cm}^{-1}$  merupakan ciri khas ikatan Zn–O yang berada pada rentang  $400\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ , sesuai dengan literatur Bashir et al. (2020), yang menegaskan bahwa struktur ZnO terbentuk dengan baik meskipun dimodifikasi dengan Cu.

Spektrum FTIR ini mengonfirmasi bahwa struktur ZnO tetap terjaga setelah modifikasi dengan Cu, dengan keberadaan puncak Zn–O yang jelas dan tidak mengalami pergeseran signifikan. Modifikasi Cu diduga terdispersi di permukaan ZnO

sehingga menciptakan pusat perangkap elektron yang dapat menekan laju rekombinasi elektron-lubang. Keberadaan gugus O–H dan karbonat di permukaan berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsi molekul target dan pembentukan radikal aktif selama fotokatalisis. Kombinasi ini menunjukkan bahwa material ZnO/Cu hasil sintesis memiliki struktur yang stabil, permukaan aktif yang kaya gugus reaktif, dan potensi kinerja fotokatalitik yang tinggi untuk aplikasi degradasi polutan.

#### b. Hasil Karakterisasi Menggunakan XRD

Karakterisasi terhadap senyawa ZnO dilakukan dengan tujuan utama untuk mengetahui fase kristal yang terbentuk dari hasil sintesis yang telah dilakukan. Melalui proses ini, dapat diperoleh informasi penting mengenai tingkat kristalinitas material, struktur kisi kristal yang dimiliki, serta estimasi ukuran partikel dari ZnO yang terbentuk. Salah satu metode yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik tersebut adalah analisis X-ray Diffraction (XRD). Hasil pengukuran XRD untuk material ZnO yang dikombinasikan dengan Cu (ZnO/Cu) ditampilkan secara visual pada Gambar 4.2, yang memberikan gambaran posisi dan intensitas puncak-puncak difraksi sebagai representasi struktur kristalnya.



**Gambar 2.** Hasil Analisis XRD ZnO/Cu .

Sumber: Laboratorium Kimia Analisa dan Instrumentasi Pengujian FMIPA UNSRI, 2025

Hasil analisis sampel XRD diatas menunjukkan adanya struktur kristal ZnO *wurtzite* dengan bentuk *hexagonal*. Puncak-puncak difraksi yang dihasilkan berada disekitar sudut ( $2\theta$ )  $16,157^\circ, 31,723^\circ, 34,267^\circ, 36,226^\circ, 45,465^\circ, 47,478^\circ, 56,549^\circ, 59,440^\circ, 62,811^\circ$ . Puncak difraksi yang dihasilkan hampir sama dengan puncak ZnO dari data standar JCPDS No.36-1451. (Tambahan et al., 2014)

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan melalui proses perhitungan yang sistematis, diperoleh nilai-nilai ukuran kristal dari masing-masing puncak difraksi pada

pola X-Ray Diffraction (XRD) sampel hasil sintesis. Nilai ukuran kristal yang didapatkan secara berurutan adalah sebesar 19,829 nm, 26,086 nm, 1,5862 nm, 21,604 nm, 31,958 nm, 13,870 nm, 21,311 nm, 6,6056 nm, dan 16,201 nm. Deretan angka tersebut menunjukkan adanya variasi dalam ukuran kristalin dari senyawa yang terbentuk di permukaan katalis ZnO hasil sintesis.

Perhitungan ukuran kristal ini ditentukan melalui perhitungan menggunakan persamaan Debye–Scherrer, yaitu metode standar untuk mengestimasi ukuran kristalin berdasarkan pelebaran puncak difraksi pada analisis X-Ray Diffraction (XRD). Setelah data ukuran kristal diperoleh, dilakukan perhitungan nilai rata-rata dari seluruh ukuran kristal yang teridentifikasi untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai distribusi tersebut. Langkah ini penting guna menilai konsistensi ukuran partikel serta mengevaluasi kualitas struktur kristal pada material katalis ZnO/Cu hasil sintesis. (T. A. Al-Dahir et al., 2023)

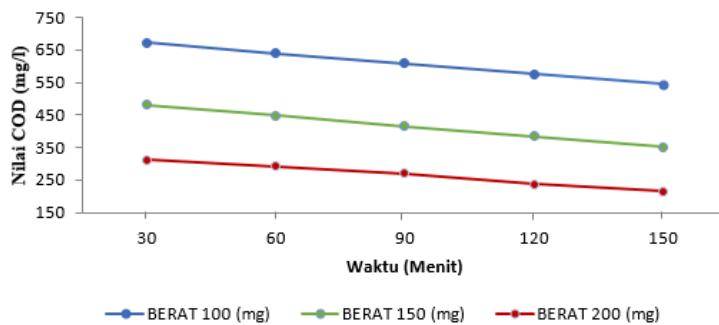
Menurut penelitian Rangkuti dkk, Tahun 2018 menunjukkan ukuran Kristal katalis ZnO dengan doping Cu berada pada angka rata-rata ukuran Kristal berkisar 35 nm. Sedangkan dari hasil penelitian ini yang telah dilakukan dan analisa perhitungan XRD katalis ZnO/Cu diperoleh bahwa rata-rata ukuran kristal berada pada kisaran 16 nanometer. Ini menunjukkan bahwasannya penelitian yang dilakukan mendapatkan katalis ZnO/Cu yang lebih baik dari penelitian sebelumnya dengan perbandingan ukuran kristal yang didapatkan dimana semakin kecil ukuran kristal maka semakin baik ukuran kristal aktif yang di dapatkan. Hal ini juga bisa terjadi dipengaruhi beberapa faktor yang membedakan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya dimana terdapat beberapa perbedaan bahan baku seperti Cu dan perbedaan langkah metode pada proses sintesis katalis sehingga pada penelitian ini didapatkan ukuran Kristal yang lebih baik dari penelitian sebelumnya. Ukuran ini juga menunjukkan bahwa partikel katalis berada dalam rentang ukuran nano, yang merupakan indikator penting dari tingkat kristalinitas. Nilai ini memperkuat bahwa sintesis berhasil membentuk struktur kristalin dengan ukuran yang relatif kecil dan seragam, hal ini secara langsung mempengaruhi luas permukaan spesifik kemampuan katalis ZnO/Cu dalam mendegradasi polutan dan senyawa berbahaya pada limbah POME.(Rangkuti <sup>1</sup> et al., 2018)

#### **Pengaruh Kontak Berat ZnO/Cu dan Waktu Penyinaran UV terhadap Nilai COD POME**

Seiring dengan pesatnya perkembangan industri perkebunan kelapa sawit di berbagai wilayah, terjadi pula peningkatan jumlah pabrik pengolahan minyak kelapa sawit yang beroperasi untuk memenuhi kebutuhan produksi. Aktivitas ini secara langsung berdampak

pada peningkatan volume limbah cair yang dihasilkan setiap harinya. Limbah cair dari proses pengolahan ini diketahui memiliki nilai **Chemical Oxygen Demand (COD)** yang sangat tinggi, Apabila limbah dengan kandungan COD tinggi ini dibuang langsung tanpa melalui proses pengolahan yang memadai, bisa menyebabkan masalah lingkungan yang serius, seperti munculnya bau yang menyengat dan tidak sedap, berkembangnya mikroorganisme patogen yang dapat mengganggu kesehatan, serta terjadinya pencemaran baik pada tanah maupun badan air di sekitarnya. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada kualitas lingkungan secara fisik dan kimia, tetapi juga dapat memengaruhi kesehatan manusia serta mengganggu keseimbangan ekosistem makhluk hidup lainnya. Oleh sebab itu, diperlukan upaya pengolahan limbah yang efektif untuk menurunkan kadar COD, guna meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan mendukung pembangunan industri yang berkelanjutan. (Hafiz et al., 2024)

Berikut nilai COD pada limbah POME setelah dilakukan pengolahan melalui metode fotokatalisis, yang dapat dilihat pada grafik Gambar 4.3 dibawah ini:



**Gambar 3.** Hubungan Waktu dan Berat terhadap Nilai COD.

Gambar 4.3 Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses fotokatalitik menggunakan katalis ZnO mampu menurunkan kadar COD secara efektif pada limbah cair kelapa sawit (POME). Semakin lama durasi penyinaran UV yang diberikan, semakin besar pula penurunan nilai COD yang terjadi, ini mengindikasikan bahwa waktu reaksi berpengaruh terhadap tingkat degradasi senyawa organik. Di sisi lain, peningkatan jumlah katalis ZnO turut meningkatkan efisiensi reaksi, karena semakin tinggi konsentrasi katalis, maka semakin banyak radikal bebas yang dihasilkan untuk mempercepat proses oksidasi. Oleh karena itu, keberhasilan fotokatalisis dalam menurunkan kadar pencemar organik sangat bergantung pada kombinasi waktu penyinaran dan dosis katalis yang digunakan akan sangat mempengaruhi penurunan nilai COD (Wahyudi et al., 2023).

Gambar 3 Menunjukan Bahwa hasil penelitian yaitu nilai COD yang tertinggi di angka 672 mg/l yang terjadi pada berat katalis 100 mg/l dan waktu penyinaran UV selama 30 menit

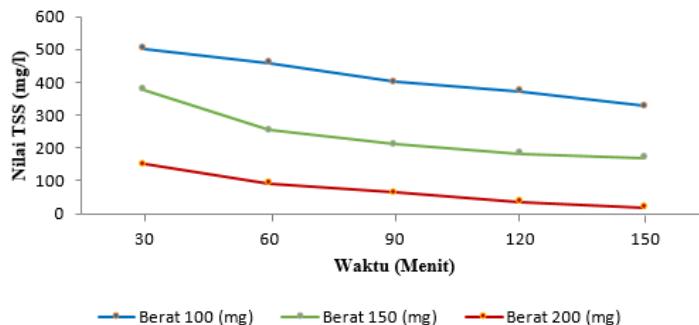
dan nilai terendah atau terbaik dari 15 sampel di dapatkan di angka 216 mg/l dimana ini terjadi pada variasi berat katalis sebesar 200 mg/l dan lama waktu penyinaran terlama yaitu 150 menit.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variabel kontak waktu penyinaran UV serta berat katalis ZnO/Cu memainkan peran yang sangat penting dalam efektivitas penurunan kadar Chemical Oxygen Demand (COD) pada limbah cair POME. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terlihat bahwa semakin besar massa katalis yang digunakan dan semakin lama durasi penyinaran UV yang diberikan, maka semakin besar pula kemampuan sistem fotokatalitik dalam menurunkan nilai COD. Hal ini dapat dibuktikan melalui hasil terbaik yang diperoleh pada kombinasi berat katalis sebesar 200 mg dan waktu penyinaran selama 150 menit, di mana nilai COD akhir yang dihasilkan mencapai 216 mg/L. Nilai ini menunjukkan penurunan yang sangat signifikan dibandingkan kondisi awal, sekaligus membuktikan bahwa kondisi tersebut mampu menurunkan kadar COD hingga berada di bawah batas maksimum baku mutu air limbah yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia (2014), yaitu sebesar 350 mg/L. Artinya pada kombinasi berat katalis tertinggi dan waktu penyinaran terlama, sampel limbah POME yang telah diolah sudah memenuhi kriteria kualitas air limbah yang aman untuk dibuang ke lingkungan. (Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2014)

#### ***Pengaruh Berat ZnO dan Waktu Penyinaran UV terhadap Nilai TSS POME***

TSS adalah residu dari padatan tersuspensi yang tertahan oleh saringan berpori minimal 2  $\mu\text{m}$  atau lebih besar dari ukuran koloid. Dalam limbah cair seperti POME, TSS mencakup campuran lumpur, tanah liat, partikel kimia (seperti oksida logam), serta mikroba seperti ganggang, bakteri, dan jamur. Pengukuran TSS penting untuk menilai tingkat pencemaran air dan efektivitas teknologi pengolahan, karena partikel tersuspensi dapat meningkatkan suhu air dengan menyerap energi matahari, mengurangi oksigen larut, dan menurunkan penetrasi cahaya kesemuanya berdampak negatif terhadap kualitas air.

TSS terdiri dari bahan padat tetap (inorganik) dan padat volatil (organik) yang dapat dihilangkan melalui proses biologis atau pembakaran. Berikut ini nilai TSS pada limbah POME setelah dilakukan pengolahan melalui metode fotokatalisis, yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 dibawah ini:



**Gambar 4.** Hubungan Waktu dan Berat terhadap Nilai TSS.

Gambar 4 Berdasarkan hasil penelitian dan hasil nilai TSS yang didapatkan bahwasannya terjadi penurunan yang cukup signifikan dimana nilai TSS mengalami penurunan terbaik dari 15 sampel pengujian yaitu pada berat katalis 200mg dan waktu penyinaran 150 menit dengan nilai TSS sebesar 20,00 mg/ l dan untuk nilai TSS yang paling sedikit mengalami penuruan yaitu pada berat 100 mg dan 30 menit penyinaran yaitu sebesar 503,33 mg/l, dari hasil ini dapat diamati bahwa kadar Total Suspended Solids (TSS) menunjukkan tren penurunan seiring dengan bertambahnya durasi waktu penyinaran. Penurunan ini berkaitan erat dengan terbentuknya radikal hidroksil ( $\text{OH}^-$ ) yang dihasilkan melalui proses fotokimia, baik dari penyinaran UV maupun dari penambahan hidrogen peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Radikal-radikal aktif tersebut berperan penting dalam mengoksidasi logam-logam berat yang terlarut dalam air, memecah senyawa-senyawa organik kompleks, serta membantu menghilangkan karakteristik warna, bau, dan rasa pada limbah cair. Dan juga peningkatan berat katalis yang juga berkontribusi signifikan pada penurunan kadar TSS.( Mohd. Rizauddin Deraman dkk et al., 2018)

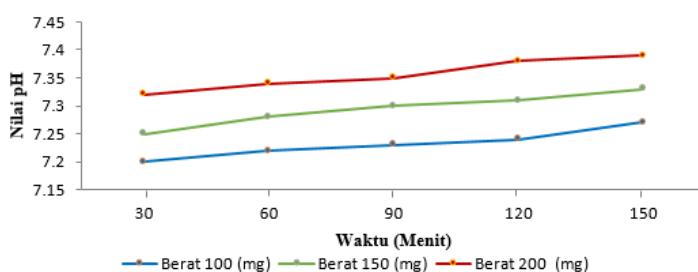
Semakin besar massa katalis yang digunakan dalam proses fotokatalitik, maka semakin banyak pula situs aktif yang tersedia pada permukaan katalis tersebut untuk membentuk radikal bebas, seperti radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ) yang sangat reaktif. Radikal ini memiliki kemampuan tinggi dalam mengoksidasi dan merombak struktur senyawa-senyawa organik maupun partikel tersuspensi dalam limbah, sehingga proses degradasi terhadap Total Suspended Solids (TSS) menjadi semakin efektif. Penambahan jumlah katalis secara langsung meningkatkan efisiensi fotokatalitik karena memperluas area aktif permukaan reaksi dan mempercepat pembentukan senyawa reaktif yang dibutuhkan dalam proses pemurnian limbah. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi antara waktu penyinaran UV yang cukup lama dan massa katalis yang memadai merupakan dua faktor utama yang sangat memengaruhi keberhasilan proses penurunan TSS pada limbah cair kelapa sawit (POME). (Saputra et al., 2021)

Hal ini dibuktikan dari hasil pengujian terhadap 15 sampel limbah cair POME menggunakan metode fotokatalis, di mana penurunan kadar TSS paling signifikan tercatat pada perlakuan dengan berat katalis tertinggi, yaitu 200 mg, dan waktu penyinaran UV terlama selama 150 menit. Pada kondisi tersebut, nilai TSS akhir mencapai 20,00 mg/L, yang menunjukkan bahwa kombinasi berat katalis dan durasi penyinaran berperan penting dalam mengoptimalkan proses pengurangan partikel tersuspensi hal ini tentunya berat katalis dan waktu penyinaran bekerja semakin baik dengan katalis yang mkin berat dan waktu penyinaran yang semakin lama. Efektivitas ini menunjukkan bahwa kondisi operasional tersebut dapat mendukung proses pengolahan limbah secara lebih efisien. Dengan hasil tersebut, limbah yang dihasilkan dinilai aman untuk dibuang ke lingkungan sesuai standar pengolahan. ( Mohammed Haji Alhaji, 2017)

#### Pengaruh Berat ZnO dan Waktu Penyinaran UV terhadap Nilai pH POME

pH merupakan indikator yang digunakan untuk mengetahui tingkat keasaman maupun kebasaan suatu larutan. Parameter ini sangat krusial dalam mengevaluasi mutu air limbah, karena memengaruhi kelangsungan hidup organisme akuatik, pertumbuhan tanaman, kesehatan manusia, serta berbagai kebutuhan industri.

Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME), memiliki sifat kimia yang kompleks, termasuk fluktuasi nilai pH. Ketidakseimbangan pH dalam POME dapat memberikan dampak buruk terhadap lingkungan apabila tidak diolah dengan benar. pH yang terlalu tinggi (basa) atau terlalu rendah (asam) dapat merusak keseimbangan ekosistem perairan, mengancam kehidupan organisme di dalamnya, serta menurunkan kualitas air dan tanah. Oleh sebab itu, pengendalian pH dalam pengolahan POME menjadi hal yang sangat penting demi menjaga kelestarian lingkungan hidup. Dan berikut ini Gambar 4.5 nilai dari pH hasil pengolahan yang telah dilakukan.



Gambar 5. Hubungan Waktu dan Berat terhadap Nilai pH.

Dari Gambar 5 menunjukkan bahwa pH dari sampel limbah POME yang telah dilakukan pengolahan melalui proses fotokatalis dapat meningkat menjadi pH yang sesuai standar baku mutu air limbah dimana yang semula pH 4,15 setelah dilakukan pengolahan

pH menjadi berkisar 7.20-7.39 dimana angka ini tergolong sudah aman berdasarkan baku mutu air limbah yaitu pH 6-9.(Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2014)

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa katalis ZnO dengan penambahan Cu efektif menurunkan nilai COD, TSS, dan menyesuaikan pH limbah POME hingga sesuai baku mutu air limbah. Variasi terbaik diperoleh pada penggunaan katalis 200 mg dengan waktu penyinaran 150 menit. Pada kondisi tersebut, COD turun hingga 216 mg/L, TSS menjadi 20 mg/L, dan pH meningkat dari 4,15 menjadi 7,20–7,39. Hasil ini membuktikan bahwa proses fotokatalis dapat berfungsi optimal dalam meningkatkan kualitas limbah POME agar aman dan memenuhi standar yang ditetapkan pemerintah.

## DAFTAR REFERENSI

- Akhbari, A., & Kutty, P. K. (2020). Studi tentang pengolahan pabrik kelapa sawit dan penilaian lingkungan terhadap pengelolaan limbah cair pabrik kelapa sawit. 25(2), 212-221.
- Chowdhury, C., Studt, F., & Jelic, J. (2025). Interaksi logam-dukungan dalam logam/oksida dan oksida/logam terbalik katalis: Studi kasus menggunakan katalis model Cu/ZnO dan ZnO/Cu. 5860-5867.
- Daratika, D. A. (2016). Sintesis nanopartikel Zn<sub>1-x</sub>Cu<sub>x</sub>O dengan metode kopresipitasi. *Jurusen Fisika*.
- Desinfeksi, P., Bakteri, F., Nan, R., Liu, S., Zhai, M., & Zhu, M. (2023). Sintesis mudah nanopartikel ZnO terdoping Cu untuk peningkatan desinfeksi fotokatalitik bakteri dan jamur.
- Engineering, C. (2017). Teknik kimia | Artikel pemodelan dan optimasi pengolahan fotokatalitik limbah cair pabrik kelapa sawit pra-perlakuan (POME) dalam sistem UV/TiO<sub>2</sub> menggunakan metodologi permukaan respons (RSM). 1916.
- Firdausi, N. I. (2020). No title. *Kaos GL Dergisi*, 8(75), 147-154. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/>
- Hafiz, M., Purwanto, H., Rahimah, & Giyanto. (2024). Analisa hubungan nilai perubahan Chemical Oxygen Demand (COD) dan pH pada Palm Oil Mill Effluent (POME) dalam proses pembuatan biogas. *Jurnal Agro Fabrica*. <https://doi.org/10.47199/jaf.v6i1.240>
- Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia*. <https://jdih.maritim.go.id/en/peraturan-menteri-negara-lingkungan-hidup-no-5-tahun-2014>
- Limbah, D., Pabrik, C., Sawit, K., Chan, Y. Bin, Aminuzzaman, M., Djearamane, S., Wong, L. S., & Foo, Y. (2024). Sintesis hijau dengan bantuan ekstrak daun Garcinia mangostana L. nanomaterial CuO, ZnO, dan CuO-ZnO untuk aplikasi fotokatalitik.
- Maru, M. T., Gonfa, B. A., Zelekew, O. A., Fakrudeen, S. P., Ananda Murthy, H. C., Bekele, E. T., & Sabir, F. K. (2023). Effect of Musa acuminata peel extract on synthesis of ZnO/CuO nanocomposites for photocatalytic degradation of methylene blue. *Green*

Chemistry Letters and Reviews, 16(1).  
<https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2232383>

- Phang, Y. K. (2021). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel CuO yang ramah lingkungan berasal dari ekstrak kulit pepaya untuk fotokatalitik degradasi limbah pabrik kelapa sawit (POME).
- Rahmati, A., Balouch Sirgani, A., Molaei, M., & Karimipour, M. (2014). Cu-doped ZnO nanoparticles synthesized by simple co-precipitation route. *European Physical Journal Plus*, 129(11). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2014-14250-8>
- Rangkuti, R. M., Harsono, H., Ghufron, M., Fisika, J., & Matematika dan Ilmu Pengetahuan, F. (2018). Sistem kendali-tenaga-elektronika-telekomunikasi-komputer studi karakterisasi sintesis nano partikel ZnO menggunakan metode kopresipitasi dengan varian konsentrasi doping Cu. *Setrum*, 7(2), 197-204.
- Ristyana, L. (2022). Analisis kandungan DO, BOD, COD, TS, TDS, TSS dan analisis karakteristik fisikokimia limbah cair industri tahu di UMKM Daerah Imogiri Barat Yogyakarta. *Universitas Ahmad Dahlan*, June.
- Saputra, W. H. (2021). Degradasi fotokatalitik limbah pabrik kelapa sawit (POME) limbah menggunakan katalis berbasis BiVO4.
- Saputra, W. H., Industri, F. T., Bandung, I. T., & No, J. G. (2021). Teknologi fotokatalitik untuk limbah cair pabrik kelapa sawit (POME) pengolahan air limbah: Kemajuan saat ini dan prospek masa depan.
- Sukresno, A. (2023). Pengukuran pH pada AirAcellator berbasis IoT di IPA PT. Tirta Gajah Mungkur Semarang. 1-52.
- Tambahan, I., Name, F., Number, I. D., Laki-laki, F., & Kerja, T. (2014). Informasi tambahan. 1, 1-8.
- Teknik, J. I., Charles, A., & Cheng, C. K. (2018). Kemajuan terbaru dalam pengolahan fotokatalitik pabrik kelapa sawit limbah cair (POME): Tinjauan. 7, 389-393.
- Wahyudi, F., Saputra, W. H., Sasongko, D., & Devianto, H. (2023). Studi pengaruh konsentrasi katalis ZnO untuk degradasi limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) menggunakan teknologi fotokatalitik. 22(02), 105-113. <https://doi.org/10.55893/jt.vol22no2.549>
- Yuniar, M., Wijayanti, P., Puspitasari, A. A., Kana, & Putri, M. (2025). Palm oil wastewater treatment (POME) using ZnO photocatalyst biosynthesis with plant extracts as stabilizers. 265-274. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-678-9\\_25](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-678-9_25)
- Zainal, N. H., & Jalani, N. O. R. F. (2020). Tinjauan tentang perkembangan limbah Palm Oil Mill Effluent (POME). 29(4).