

Studi Pengaruh Konsentrasi Katalis ZnO untuk Degradasi Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) Menggunakan Teknologi Fotokatalitik

Farizky Wahyudi¹, Wibawa Hendra Saputera¹, Dwiwahju Sasongko¹, dan Hary Devianto¹

¹Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

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

Abstrak

Indonesia merupakan salah satu negara *center market* kelapa sawit terbesar di dunia sehingga perkembangan industri kelapa sawit dalam negeri tumbuh dengan sangat pesat. Namun, meningkatnya aktivitas perdagangan kelapa sawit berdampak terhadap meningkatnya limbah yang dihasilkan yaitu *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Mayoritas pabrik saat ini masih menggunakan *open pond* sebagai teknologi pengolahan POME, namun penggunaan teknologi ini dinilai belum efektif untuk pengolahan POME. Fotokatalitik merupakan teknologi berbasis energi sinar (UV, tampak, sinar matahari) untuk menghasilkan senyawa radikal yang dimanfaatkan sebagai agen pengoksidasi limbah POME. Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah ZnO. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD dan UV-vis DRS, struktur kristal dari ZnO adalah *hexagonal wurtzite* dengan energi celah pita sebesar 3,22 eV. Berdasarkan hasil uji aktivitas degradasi fotokatalitik limbah POME, diperoleh bahwa penggunaan katalis ZnO dengan konsentrasi 0,5 g/L dinilai cukup efisien untuk mendegradasi kandungan organik pada limbah POME dengan persentase reduksi *chemical oxygen demand* (COD) mencapai 22,85%, warna 48,53% dengan konstanta laju reaksi COD (*k*) adalah $2,6 \times 10^{-3}$ menit⁻¹.

Kata kunci: POME, fotokatalitik, COD, radikal, ZnO

Abstract

Indonesia is among the world's largest palm oil market countries leading to significant growth in the domestic palm oil industry. However, the increase in palm oil trading has also led to a rise in the production of waste known as Palm Oil Mill Effluent (POME). Currently, the majority of factories use open ponds for POME processing, but this method is considered ineffective for treating POME. To address this issue, researchers are exploring photocatalytic technology, which utilizes light energy (UV, visible, sunlight) to produce radical compounds that act as oxidizing agents for POME degradation. In this study, ZnO was employed as a catalyst. The XRD and UV-vis DRS characterizations confirmed that ZnO had a hexagonal wurtzite crystal structure with a band gap energy of 3,22 eV. The photocatalytic activity test results revealed that using 0.5 g/L ZnO catalyst proved to be efficient in degrading organic content in POME. The percentage of chemical oxygen demand (COD) degradation reached 22.85%, color degradation reached 48.53% and the reaction rate kinetics constant of COD degradation was at 2.6×10^{-3} min⁻¹.

Keywords: POME, photocatalytic, COD, radical, ZnO

1. Pendahuluan

Permasalahan mengenai lingkungan merupakan isu serius yang saat ini dihadapi oleh seluruh kalangan terutama dari sektor perindustrian. Pihak industri dituntut agar limbah yang dihasilkan sesuai dengan standar pembuangan yang telah ditetapkan oleh Pemerintah supaya tidak mencemari lingkungan. Salah satu limbah yang sukar diolah adalah limbah yang berasal dari pabrik kelapa sawit yaitu *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Limbah ini sangat berpotensi mencemari lingkungan karena kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) yang tinggi.

Secara umum, POME di Indonesia memiliki nilai COD sekitar 15.000 hingga 100.000 mg/L dan BOD 10.250 hingga 100.000 mg/L (Rajani dkk., 2019). Berdasarkan nilai tersebut, POME yang dihasilkan oleh pabrik kelapa sawit tidak dapat dibuang langsung ke lingkungan melainkan harus dilakukan pengolahan terlebih dahulu yang bertujuan untuk menurunkan nilai COD dan BOD. Pemerintah Indonesia telah menetapkan standar pembuangan limbah untuk industri kelapa sawit dalam PermenLH No. 5 tahun 2014 yang menyatakan bahwa kadar COD dan BOD maksimal yang boleh dibuang ke lingkungan adalah 350 mg/L dan 100 mg/L.

Indonesia sebagai negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia mengalami masalah mendesak dalam pengolahan POME. Mayoritas pabrik kelapa sawit saat ini masih menggunakan sistem konvensional, seperti kolam terbuka (*open pond*) sebagai basis dalam pengolahan POME. Penelitian yang dilakukan oleh Badrun dkk., (2019), menunjukkan bahwa dalam waktu 14 bulan, sekitar 3.380 kg COD bocor ke sungai akibat pengolahan POME yang belum memadai. Oleh karena itu, diperlukan teknologi alternatif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah pengolahan POME, salah satunya adalah teknologi fotokatalitik (Saputera, Amri, Daiyan, dkk., 2021).

Info Makalah:

Dikirim : 07-18-23;

Revisi 1 : 08-26-23;

Revisi 2 : 08-30-23;

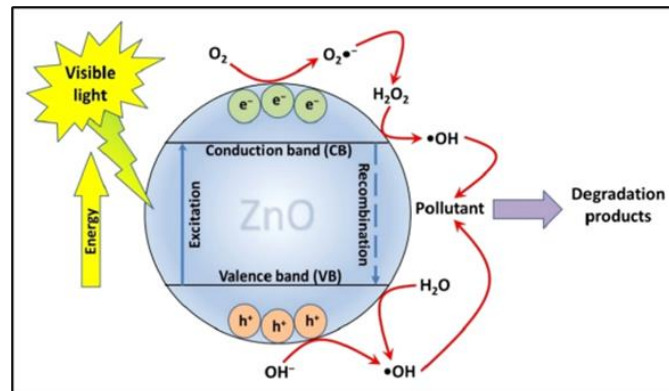
Diterima : 09-06-23.

Penulis Korespondensi:

Telp : -

e-mail : whsaputera@itb.ac.id

Teknologi fotokatalitik merupakan suatu teknologi berbasis energi terbarukan dengan memanfaatkan cahaya/sinar sebagai sumber energi untuk mendegradasi limbah organik melalui reaksi reduksi-oksidasi. Mekanisme teknologi fotokatalitik ditunjukkan dalam Gambar 1. Pada awalnya, material semikonduktor menyerap cahaya, menyebabkan perpindahan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Sebagai akibat dari perpindahan elektron ini, molekul oksigen bereaksi dengan elektron di pita konduksi (mengalami reduksi) membentuk senyawa radikal superoksida ($\bullet\text{O}_2^-$), sedangkan air akan bereaksi dengan muatan positif (*holes*) di pita valensi (mengalami oksidasi) membentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$). Senyawa radikal yang dihasilkan ini yang berperan dalam mendegradasi senyawa organik pada POME sehingga dapat menurunkan kadar COD dan kekeruhan. Namun, teknologi ini memiliki keterbatasan yaitu laju rekombinasi elektron-*holes* yang cepat, dimana elektron yang telah berpindah ke pita konduksi dapat kembali ke pita valensi, menghambat proses redoks berjalan dengan efektif.



Gambar 1. Mekanisme Proses Fotokatalitik dalam Mendegradasi Limbah Organik (Abdullah dkk., 2017).

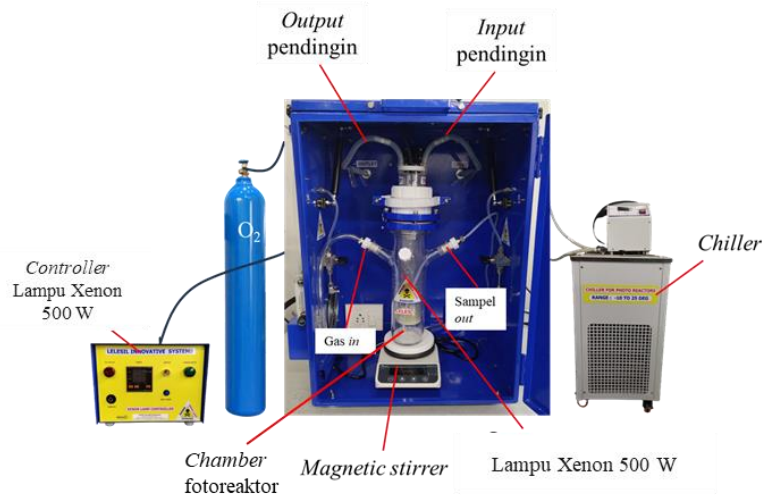
Semikonduktor merupakan material yang memiliki sifat diantara konduktor dan insulator. Kelebihan material semikonduktor memiliki energi celah pita $< 1 - 6$ eV, sehingga memungkinkan proses fotoeksitasi elektron berlangsung dan mencegah terjadinya rekombinasi elektron (Ameta dkk., 2018). Semikonduktor ZnO merupakan semikonduktor yang baik digunakan untuk proses fotokatalitik karena tingginya energi celah pita yaitu 3,2 eV (Karthikeyan dkk., 2020), sehingga pada penelitian ini akan dipelajari lebih lanjut terhadap pemakaian semikonduktor ZnO untuk mendegradasi kandungan COD dan kekeruhan pada limbah POME.

2. Metode

Penelitian yang dilakukan terdiri dari dua variabel yaitu bebas dan terikat. Adapun variabel terikat terdiri dari jenis katalis ZnO yang diperoleh secara komersial dan laju alir oksigen 70 mL/menit, sedangkan variabel bebas adalah konsentrasi umpan katalis yaitu 0,25 g/L dan 0,5 g/L dari volume POME. Berikut akan dipaparkan lebih rinci mengenai teknis serta tahapan dalam studi ini.

2.1. Bahan dan Peralatan Utama

Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah ZnO (Merck, ≥ 99 %) yang diperoleh secara komersial dan aquades. Peralatan utama dalam penelitian ini adalah perlengkapan fotoreaktor. Perlengkapan fotoreaktor terdiri dari beberapa alat seperti *chiller*, lampu Xenon 500 W beserta *controller* (Lelesil Innovation System, India) dan *chamber* fotoreaktor seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan, mula-mula katalis ZnO ditimbang sesuai dengan variasi konsentrasi kemudian dilarutkan ke dalam 350 mL POME yang sudah diencerkan sebanyak 40 kali dan dilanjutkan ultrasonikasi (Hwashin Ultrasonic, Power Sonic 410) selama 60 menit. Larutan yang telah disonikasi selanjutnya dilakukan penjenjuran gas oksigen ($\geq 95\%$, CV Sangkuriang) 70 mL/menit selama 30 menit agar mencapai kondisi setimbang. Setelah setimbang, *chiller* dan lampu xenon 500 W dinyalakan selama 100 menit dan dilakukan pengambilan sampel setiap 20 menit. Tahapan terakhir sampel yang telah diambil dilakukan analisis COD dan warna mengikuti prosedur SNI 6989:2019 dan SNI 6989.80:2011.



Gambar 2. Perlengkapan Alat Fotoreaktor.

2.2. Karakterisasi Katalis dan Analisis COD serta Warna pada POME

Karakterisasi katalis berperan untuk mempelajari struktur penyusun suatu material yang meliputi komponen morfologi serta analisis fisik-kimia pada suatu material. Pada Studi ini, karakterisasi katalis yang dilakukan adalah *X-ray diffraction* (XRD, Bruker D8 Advance, USA) untuk menentukan struktur kristal material dan *UV-Vis diffuse reflectance spectroscopy* (UV-VIS DRS, Thermo Scientific Evolution 200, USA) untuk menentukan energi celah pita (*bandgap energy*) pada katalis.

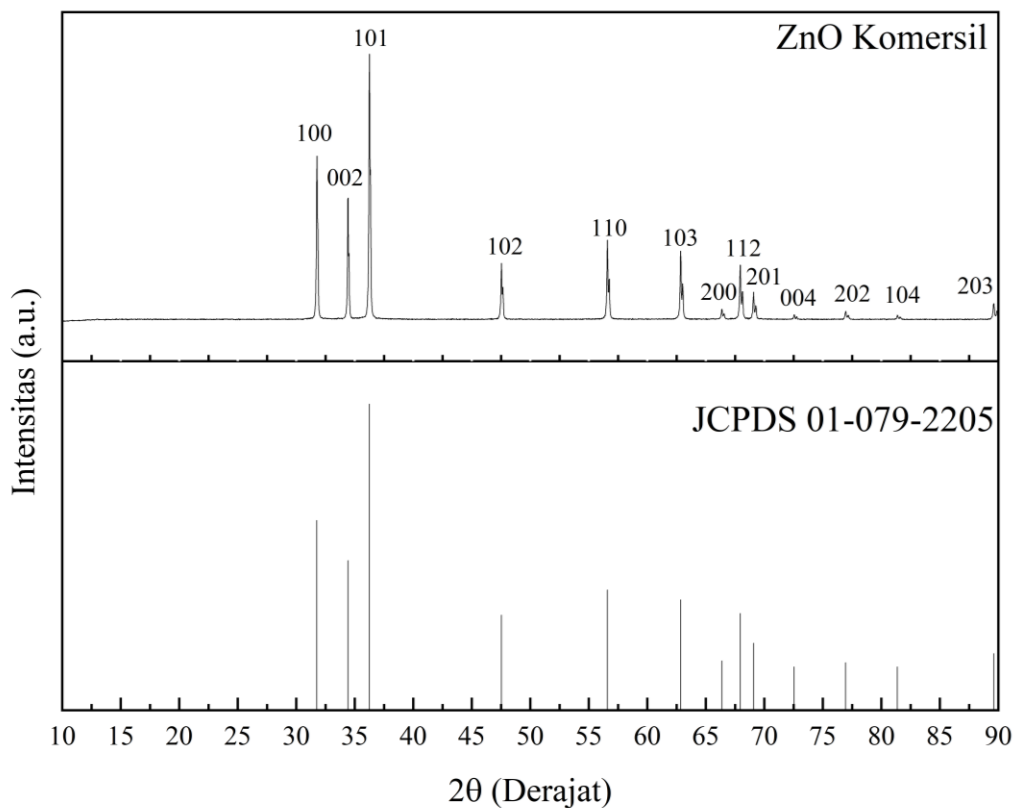
Pembacaan konsentrasi COD dilakukan dengan mengikuti SNI 6989.73 : 2019 Air dan Air Limbah – Bagian 2. Pengambilan POME dalam sistem fotoreaktor setiap 20 menit menggunakan *disposable syringe* 10 mL yang dipasang pada *syringe filter* (ukuran 0,22 μm). Setelah POME diambil dan filtrasi, sebanyak 2,5 mL POME diinjeksikan ke dalam *test tube* beserta pelarutnya dan dipanaskan pada suhu 150 °C selama 2 jam dengan peralatan *Hach DRB-200* COD. Sampel didiamkan hingga suhu ruangan sebelum dianalisis absorbansinya menggunakan *double beam* spektrofotometri (Shimadzu 1800, Jepang) pada panjang gelombang 550 – 650 nm. Prosedur pengujian warna pada POME menggunakan metode yang diterbitkan oleh pemerintah melalui SNI 6989.80:2011 Air dan Air Limbah - Bagian 80 : Cara uji warna secara spektrofotometri. Penentuan kurva kalibrasi dilakukan dengan mengencerkan larutan induk 500 PtCo pada berbagai varian konsentrasi yang selanjutnya dilakukan penentuan absorbansi POME yang telah difiltrasi pada panjang gelombang 400 nm.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakterisasi Katalis

a. Karakterisasi XRD

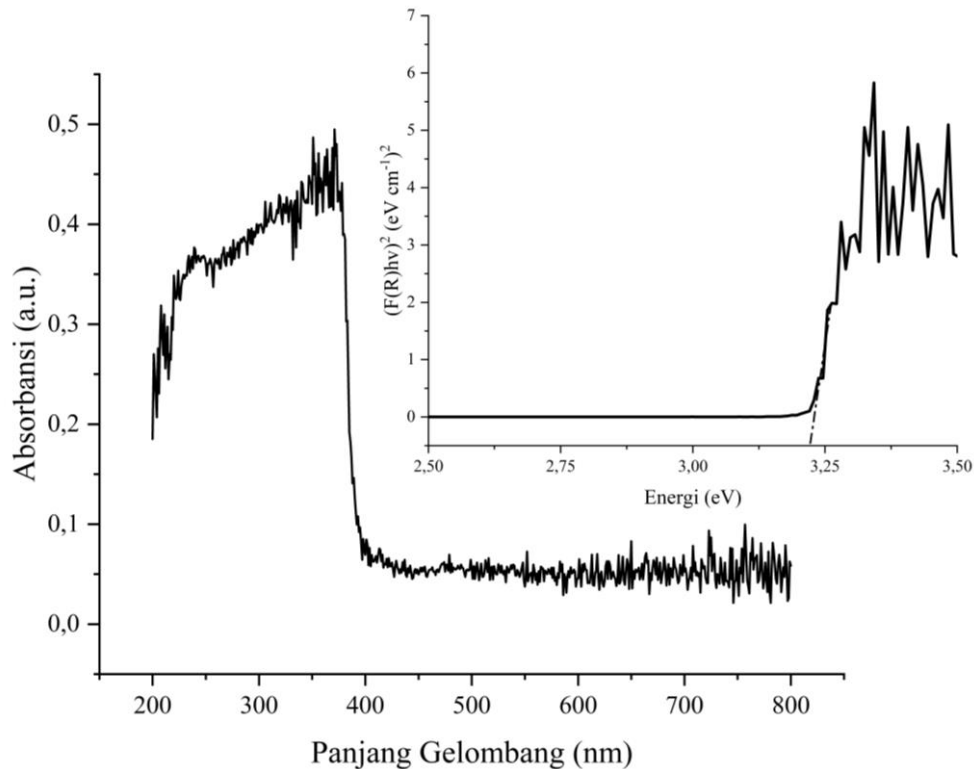
Karakterisasi XRD bertujuan untuk menentukan struktur kristal dan senyawa penyusun dari sebuah katalis. Hasil karakterisasi XRD ZnO komersial ditunjukkan pada Gambar 3 kemudian dicocokkan dengan *database JCPDS International Center of Diffraction Data* menggunakan *software X'pert Highscore*. Berdasarkan kecocokan tersebut diperoleh bahwa jenis struktur kristal yang diperoleh adalah *Hexagonal Wurtzite P63MC* dengan puncak terletak pada 2 θ 31,76°, 34,41°, 36,25°, 47,53°, 56,59°, 62,85°, 66,37°, 67,94°, 69,08°, 72,56°, 76,95°, 81,37° dan 89,6°. Adapun persentase kristalin yang diperoleh berdasarkan analisis tersebut adalah 83,5% dan 16,5% bersifat amorf yang mengindikasikan struktur kristal yang terbentuk lebih teratur dan terulang secara konsisten.



Gambar 3. Difraktogram Katalis ZnO Komersil yang Dibandingkan dengan Standar JCPDS.

b. Karakterisasi Spektrofotometri UV-VIS DRS

Karakterisasi spektrofotometri bertujuan untuk menentukan energi celah (E_g) pita pada katalis. Energi celah pita merupakan energi yang dimiliki oleh katalis untuk melakukan proses fotoeksitasi elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Jika suatu katalis memiliki energi celah pita yang tinggi, maka energi yang dibutuhkan oleh foton harus lebih tinggi agar proses fotoeksitasi dapat terjadi ($E > E_g$). Namun, rendahnya energi celah pita berpotensi untuk terjadinya rekombinasi elektron sehingga proses redoks diantara kedua pita tidak dapat terjadi. Penentuan energi celah dihitung dengan persamaan Kubelka-Munk kemudian diplot dengan metode Tauc Plot dan ditarik garis linear hingga memotong sumbu energi (sumbu x) seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.



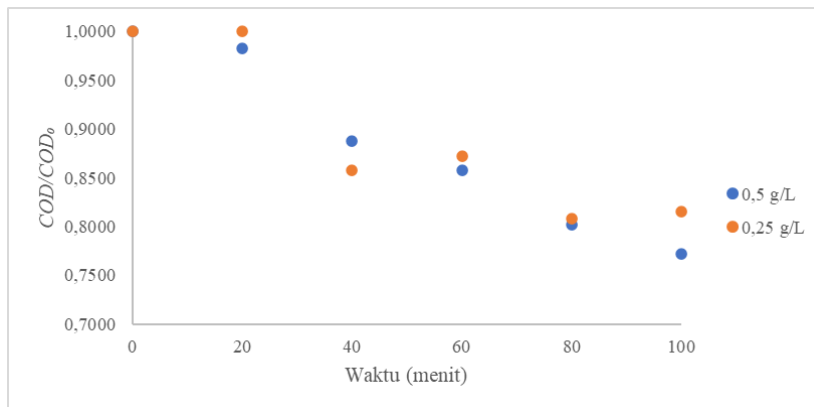
Gambar 4. Touc Plot pada Katalis ZnO Komersial.

Gambar 4 menunjukkan bahwa aktivitas penyerapan katalis lebih intens terjadi pada penyinaran penggunaan panjang gelombang sinar UV (200 – 400 nm) dibandingkan penyinaran panjang gelombang sinar tampak. Berdasarkan Gambar 3, ZnO komersial memiliki energi celah pita 3,22 eV. Semakin tinggi nilai energi celah pita suatu material maka semakin besar pula energi foton yang harus disediakan. Selain itu, material dengan energi celah pita yang rendah memiliki kemampuan penyerapan foton lebih baik sehingga laju fotoeksitasi elektron lebih cepat. Türkyılmaz dkk., (2017) telah mengkaji salah satu strategi untuk menurunkan energi celah pita pada katalis ZnO dengan metode *doping* dengan logam. Energi celah pita pada katalis ZnO murni adalah 3,24 eV sedangkan energi celah pita setelah di *doping* dengan beberapa logam seperti Ag, Ni, Fe dan Mn adalah 3,15, 3,10, 3,05 dan 3,00 eV. Fenomena penurunan energi celah pita akibat *doping* logam karena terjadi pergeseran energi celah pita menjadi lebih rendah. Selain itu, keberadaan logam juga berperan sebagai penangkap elektron (*electron scavenger*) pada pita konduksi sehingga kinerja fotokatalis menjadi lebih efisien dengan mengurangi laju rekombinasi elektron-*holes*.

3.2. Uji Aktivitas Katalis

a. Penurunan Parameter COD pada Limbah POME

COD merupakan parameter yang menunjukkan kebutuhan oksigen terlarut untuk mengoksidasi zat organik dalam air limbah secara kimiawi. Parameter COD sering digunakan untuk menentukan kualitas akuatik, sehingga nilai COD yang besar menunjukkan semakin tinggi zat organik dalam suatu lingkungan. Proses degradasi zat organik dengan menggunakan fotokatalis ZnO komersial telah dilakukan dengan konsentrasi umpan katalis sebesar 0,25 dan 0,5 g/L selama 100 menit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Adapun notasi C/C_0 merupakan perbandingan nilai COD pada waktu t menit dan COD pada waktu awal (0 menit).

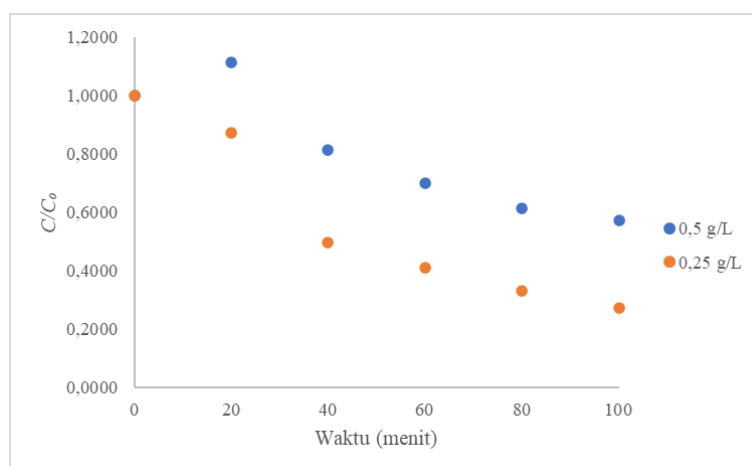


Gambar 5. Pengaruh Konsentrasi Katalis terhadap Penurunan Parameter COD pada Limbah POME.

Gambar 5 menunjukkan bahwa perbandingan nilai COD semakin menurun seiring dengan semakin lamanya waktu operasi. Hal ini menunjukkan bahwa adanya katalis ZnO cukup berperan untuk mendegradasi kandungan organik pada POME. Selain itu, jika ditinjau dari pengaruh konsentrasi umpan katalis yang ditambahkan, performa dengan konsentrasi katalis 0,5 g/L menunjukkan penurunan yang lebih signifikan dibandingkan dengan 0,25 g/L yang lebih fluktuatif. Fenomena ini dapat disebabkan oleh pengaruh konsentrasi umpan katalis yang berdampak terhadap laju degradasi zat organik. Selain itu terdapat penurunan COD yang cukup signifikan pada menit ke 40 dibandingkan dengan menit yang lain, hal ini mengindikasikan bahwa waktu aktifnya katalis ZnO bekerja berada pada rentang 20-40 menit waktu operasi. Secara umum, proses degradasi fotokatalitik bergantung dengan tingkat produksi senyawa radikal. Oleh karena itu, korelasi terhadap semakin banyak katalis yang diumpankan maka semakin banyak pula pembentukan senyawa radikal yang terjadi (Ng & Cheng, 2016). Adapun persentase akhir nilai COD yang diperoleh pada konsentrasi katalis 0,5 g/L adalah 22,85% dan 0,25 g/L adalah 18,44%. Penelitian lain terkait degradasi POME dengan katalis ZnO secara fotokatalitik juga dilakukan Ng dkk., (2017), dalam penelitiannya diperoleh persentase COD terhadap degradasi POME mencapai 51,83% dengan konsentrasi katalis 1 g/L, kemudian penelitian serupa juga dilakukan oleh Lam dkk., (2018) dengan katalis ZnO memperoleh persentase akhir penurunan COD adalah 96% selama 240 menit. Jika dibandingkan dengan penelitian Lam dkk., (2018) hasil pada penelitian ini masih memperoleh angka degradasi yang cukup kecil, hal ini dapat disebabkan adanya perbedaan kondisi operasi yang digunakan seperti jenis katalis ZnO, konsentrasi katalis, dan waktu reaksi. Oleh karena itu, untuk memperoleh hasil degradasi POME yang optimal perlu dilakukan optimasi kondisi operasi proses yang tepat.

b. Penurunan Parameter Warna pada Limbah POME

Karakteristik POME secara visual berwarna coklat, kental dan berbau tajam. Gambar 6 menunjukkan pengaruh konsentrasi umpan katalis terhadap penurunan zat warna pada POME.



Gambar 6. Pengaruh Konsentrasi Katalis terhadap Penurunan Parameter Warna pada Limbah POME.

Berdasarkan Gambar 6 terlihat bahwa katalis dengan konsentrasi 0,25 g/L memberikan efisiensi penurunan warna POME lebih baik dari pada 0,5 g/L. dengan efisiensi penurunan kandungan zat warna yang dihasilkan secara berturut-turut adalah 73,5% dan 48,35%. Seperti yang diketahui bahwa konsentrasi katalis korelasi terhadap pembentukan senyawa radikal. Namun, semakin banyak katalis yang ditambahkan juga berdampak terhadap meningkatnya

kekeruhan warna analit yang diperoleh, kekeruhan ini dapat disebabkan oleh sifat atau pengotor katalis sendiri yang terkandung dalam katalis ZnO (León dkk., 2017). Selain itu, adanya pencahayaan dari lampu yang diberikan juga turut memfasilitasi proses *leaching* pengotor katalis ke dalam analit. Adanya proses *leaching* tentunya tidak diinginkan selama proses katalisis berlangsung karena dapat melarutkan komponen aktif katalis ke dalam medium reaksi sehingga laju degradasi kekeruhan semakin lambat. Asumsi lain penyebab terjadinya perubahan warna pada POME adalah akibat adanya penyerapan sinar oleh senyawa organik. Beberapa senyawa organik pada POME memiliki penyerapan sinar pada spektrum panjang gelombang tertentu, terutama senyawa yang berperan sebagai kromofor. Kromofor merupakan molekul penyusun senyawa organik yang memiliki sifat penyerapan sinar yang kuat, sehingga adanya senyawa kromofor dapat memfasilitasi terjadinya proses fotolisis dan mengakibatkan terjadinya perubahan struktur molekul pada POME menjadi lebih jernih (Hodzic dkk., 2015). Meskipun demikian, proses degradasi warna pada POME tidak mudah untuk dilakukan terdapat beberapa penyusun senyawa kompleks yang berperan untuk memberikan warna pada POME yang sulit untuk didegradasi oleh senyawa radikal karena memiliki energi ikatan yang kuat. Salah satu senyawa kompleks penyumbang warna pada POME adalah senyawa fenol (10 – 100 mg/L), Morales-Flores dkk., (2011) melakukan penelitian terkait degradasi fenol secara fotokatalitik menggunakan semikonduktor ZnO, berdasarkan penelitian tersebut diperoleh bahwa untuk mendegradasi 15 ppm POME diperlukan waktu 540 menit.

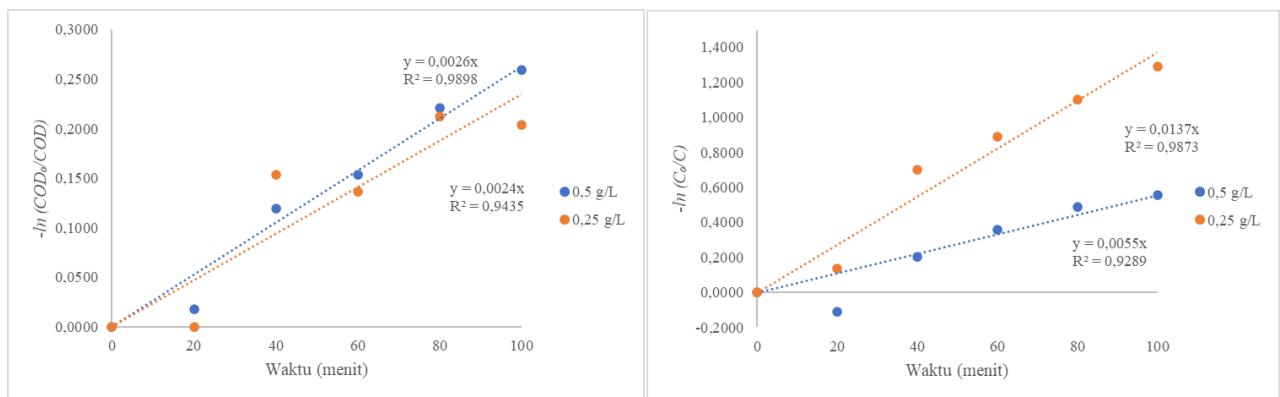
c. Kinetika Reaksi

Berdasarkan data degradasi kandungan organik (COD) dan warna yang telah diperoleh selanjutnya dapat ditentukan kinetika reaksi penurunannya. Secara umum terdapat tiga pendekatan untuk menentukan kinetika reaksi, diantaranya Langmuir-Hinshelwood (L-H), Eley-Rideal (ER) dan Mars Van Krevelen (MVK). Pada penelitian ini pendekatan perhitungan kinetika reaksi menggunakan L-H, hal ini dilandasi terhadap asumsi reaksi terjadi di permukaan katalis serta adanya proses adsorpsi dan desorpsi terhadap dua reaktan. Selain itu, asumsi kondisi reaksi berupa kuasi *first order reaction* juga turut dipertimbangkan atas dasar salah satu reaktan (oksigen) dianggap dalam keadaan jenuh sehingga hanya dianalisis perubahan konsentrasi senyawa organik yang direpresentasikan melalui analisis perubahan warna dan COD. Berdasarkan asumsi tersebut, penentuan kinetika dapat diekspresikan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1 dan 2.

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

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

Keterangan C_0 adalah konsentrasi mula-mula (0 menit) dan C adalah konsentrasi saat waktu t (menit) serta k merupakan konstanta laju reaksi nyata (menit^{-1}). Untuk menentukan konstanta laju reaksi (k) dilakukan plot linear antara $-\ln(C_0/C)$ vs waktu (t) sehingga k merupakan *slope* dari kelinearan plot seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva Kinetika Reaksi *Pseudo-First-Order* untuk Parameter (a) COD dan (b) Warna pada Limbah POME.

Gambar 7 menunjukkan hasil analisis plot $\ln C_0/C$ vs t terhadap perbandingan konsentrasi katalis ZnO 0,5 dan 0,25 g/L. Diperoleh bahwa laju degradasi POME terhadap parameter COD dengan konsentrasi 0,5 g/L lebih tinggi dibandingkan dengan 0,25 g/L dengan masing-masing nilai $2,6 \times 10^{-3}$ dan $2,4 \times 10^{-3}$ menit^{-1} . Kinetika degradasi parameter warna tertinggi diperoleh pada konsentrasi katalis 0,25 g/L dibandingkan dengan konsentrasi 0,5 g/L. Perbedaan kinetika reaksi yang diperoleh selaras dengan persentase degradasi katalis dimana laju degradasi POME

parameter COD tertinggi diperoleh pada konsentrasi katalis 0,5 g/L sedangkan laju degradasi parameter warna pada 0,25 g/L. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, berikut ditunjukkan **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.** perbandingan hasil penelitian

degradasi POME dengan parameter COD, warna dan konstanta kinetika reaksi dengan penelitian sebelumnya. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, percobaan degradasi POME menggunakan ZnO komersial memperoleh persentase yang masih rendah, namun konstanta kinetika laju reaksi yang diperoleh masih cukup tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa performa katalis sangat bergantung terhadap jenis katalis yang digunakan, selain itu perlakuan modifikasi katalis juga turut mempengaruhi performa kinerja katalis.

Katalis	Konsentrasi Katalis (g/L)	Energi Celah Pita (eV)	Sumber Sinar	Waktu Kontak (menit)	Penurunan COD (%)	Penurunan Warna (%)	Konstanta kinetika laju reaksi (menit ⁻¹)	Referensi
ZnO Komersil	0,5	3,22	Xenon 500 Watt	100	22,85	48,35	$2,6 \times 10^{-3}$	Penelitian ini
BiVO ₄	1	2,50	Xenon 300 Watt	240	24	-	$1,04 \times 10^{-3}$	(Saputera, Amri, Mukti, dkk., 2021)
CaFe ₂ O ₄	0,75	1,52	Xenon 500 Watt	480	69,05	-	$2,71 \times 10^{-3}$	(Charles dkk., 2019)
TiO ₂ Komersil	1	3,15	UV 100 Watt	1200	78	-	$2,9 \times 10^{-3}$	(Ng & Cheng, 2015)
WO ₃	0,5	3,59	UV	960	84,7	98,28	$3,2 \times 10^{-3}$	(Y. W. Cheng dkk., 2017)
TiO ₂ /Ag	1	2,50	UV 100 Watt	480	85	-	$3,58 \times 10^{-3}$	(C. K. Cheng dkk., 2016)
TiO ₂ /Cu	0,83	-	UV 1000 Watt	420	> 40	-	$2,60 \times 10^{-5}$	(Ng dkk., 2014)
TiO ₂ /Pt	1	3,15	UV 100 Watt	480	90	-	$1,34 \times 10^{-3}$	(C. K. Cheng dkk., 2015)

Tabel 1. Perbandingan Hasil Penelitian dalam Studi Terkait.

Kesimpulan

ZnO merupakan semikonduktor yang efektif untuk mendegradasi senyawa organik pada POME, serta adanya pengaruh konsentrasi penambahan ZnO pada katalis turut memberikan pengaruh terhadap efisiensi proses. Dari hasil karakterisasi katalis diperoleh struktur kristal ZnO merupakan *hexagonal wurtzite* dengan energi celah pita adalah 3,22 eV. Hasil uji aktivitas menunjukkan bahwa efisiensi degradasi POME terhadap parameter COD lebih baik pada konsentrasi katalis 0,5 g/L dengan persentase degradasi sebesar 22,85% yang disebabkan sisi aktif katalis lebih banyak dibandingkan konsentrasi katalis 0,25 g/L. Namun, semakin banyak katalis yang ditambahkan memberikan efek keruh terhadap analit (POME) sehingga degradasi warna pada POME lebih efektif pada konsentrasi katalis 0,25 g/L dengan persentase degradasi adalah 73,5%.

Daftar Notasi

- C = Konsentrasi warna [mg/L]
 C_0 = Konsentrasi warna pada $t = 0$ [mg/L]
 COD = COD POME [mg/L]
 COD_0 = COD POME pada $t = 0$ [mg/L]

Daftar Pustaka

- Abdullah, H., Khan, M. M. R., Ong, H. R., & Yaakob, Z. (2017). Modified TiO₂ photocatalyst for CO₂ photocatalytic reduction: An overview. *Journal of CO₂ Utilization*, 22(March), 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.08.004>
- Ameta, R., Solanki, M. S., Benjamin, S., & Ameta, S. C. (2018). Photocatalysis. Dalam *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology* (hlm. 135–175). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00006-1>
- Badrun, Y., Retnawati, S. F., Fauzi, M. R., Harahap, I., & Anggraini, D. A. (2019). Analisis pencemaran sungai Rokan akibat kegiatan pabrik kelapa sawit. 2018, 24–36.
- Charles, A., & Cheng, C. K. (2019). Photocatalytic treatment of palm oil mill effluent by visible light-active calcium ferrite: Effects of catalyst preparation technique. *Journal of Environmental Management*, 234, 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.024>

- Charles, A., Khan, M. R., Ng, K. H., Wu, T. Y., Lim, J. W., Wongsakulphasatch, S., Witoon, T., & Cheng, C. K. (2019). Facile synthesis of CaFe_2O_4 for visible light driven treatment of polluting palm oil mill effluent: Photokinetic and scavenging study. *Science of the Total Environment*, 661, 522–530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.195>
- Cheng, C. K., Deraman, M. R., Ng, K. H., & Khan, M. R. (2016). Preparation of titania doped argentine photocatalyst and its photoactivity towards palm oil mill effluent degradation. *Journal of Cleaner Production*, 112, 1128–1135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.104>
- 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, Y. W., Chang, Y. S., Ng, K. H., Wu, T. Y., & Cheng, C. K. (2017). Photocatalytic restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using tungsten oxides catalyst. *Journal of Cleaner Production*, 162, 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.023>
- Hodzic, A., Madronich, S., Kasibhatla, P. S., Tyndall, G., Aumont, B., Jimenez, J. L., Lee-Taylor, J., & Orlando, J. (2015). Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols: effect on secondary organic aerosol formation and lifetime Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 15, 8113–8149. <https://doi.org/10.5194/acpd-15-8113-2015>
- Karthikeyan, C., Arunachalam, P., Ramachandran, K., Al-Mayouf, A. M., & Karuppuchamy, S. (2020). Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications. Dalam *Journal of Alloys and Compounds* (Vol. 828). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154281>
- Lam, S. M., Wong, K. A., & Sin, J. C. (2018). Fabrication of Flower-like ZnO Micro/Nanostructures for Photodegradation of Pre-treated Palm Oil Mill Effluent. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 112(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/112/1/012003>
- León, D. E., Zúñiga-Benítez, H., Peñuela, G. A., & Mansilla, H. D. (2017). Photocatalytic Removal of the Antibiotic Cefotaxime on TiO_2 and ZnO Suspensions Under Simulated Sunlight Radiation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 228(9). <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3557-4>
- Morales-Flores, N., Pal, U., & Sánchez Mora, E. (2011). Photocatalytic behavior of ZnO and Pt-incorporated ZnO nanoparticles in phenol degradation. *Applied Catalysis A: General*, 394(1–2), 269–275. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2011.01.011>
- Ng, K. H., & Cheng, C. K. (2015). A novel photomineralization of POME over UV-responsive TiO_2 photocatalyst: kinetics of POME degradation and gaseous product formations. *RSC Advances*, 5(65), 53100–53110. <https://doi.org/10.1039/c5ra06922j>
- Ng, K. H., & Cheng, C. K. (2016). Photo-polishing of POME into CH_4 -lean biogas over the UV-responsive ZnO photocatalyst. *Chemical Engineering Journal*, 300, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.105>
- Ng, K. H., Deraman, M. R., Ang, C. H., Chong, S. K., Kong, Z. Y., Khan, M. R., & Cheng, C. K. (2014). Phototreatment of palm oil mill effluent (POME) over Cu/TiO_2 photocatalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 9(2), 121–127. <https://doi.org/10.9767/bcrec.9.2.6011.121-127>
- Ng, K. H., Khan, M. R., Ng, Y. H., Hossain, S. S., & Cheng, C. K. (2017). Restoration of liquid effluent from oil palm agroindustry in Malaysia using UV/ TiO_2 and UV/ZnO photocatalytic systems: A comparative study. *Journal of Environmental Management*, 196, 674–680. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.078>
- Rajani, A., Kusnadi, Santosa, A., Saepudin, A., Gobikrishnan, S., & Andriani, D. (2019). Review on biogas from palm oil mill effluent (POME): Challenges and opportunities in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 293(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/293/1/012004>
- Saputera, W. H., Amri, A. F., Daiyan, R., & Sasongko, D. (2021). Photocatalytic technology for palm oil mill effluent (POME) wastewater treatment: Current progress and future perspective. *Materials* (Vol. 14, Nomor 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14112846>
- 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 BiVO_4 based catalysts. *Molecules*, 26(20). <https://doi.org/10.3390/molecules26206225>
- Türkyılmaz, Ş. Ş., Güy, N., & Özacar, M. (2017). Photocatalytic efficiencies of Ni, Mn, Fe and Ag doped ZnO nanostructures synthesized by hydrothermal method: The synergistic/antagonistic effect between ZnO and metals. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 341, 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2017.03.027>