

DEGRADASI SENYAWA ORGANIK PADA *PALM OIL MILL SECONDARY EFFLUENT* MENGGUNAKAN FOTOKATALIS TiO_2

Indriana Lestari

Program Studi Pengolahan Hasil Perkebunan Kelapa Sawit

Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi – Bekasi

Email : indriana.lestari@cwe.ac.id;

Abstrak

Degradasi senyawa organik pada *palm oil mill secondary effluent* secara fotokatalisis menggunakan fotokatalis TiO_2 dengan aerasi berupa udara telah dilakukan dalam sistem foto reaktor *semi batch* dilengkapi lampu Merkuri 350 W. Konsentrasi senyawa organik dalam POMSE dianalisis dengan Spektrofotometer UV-Vis. Uji fotodegradasi menunjukkan bahwa fotokatalis TiO_2 mampu mendegradasi senyawa organik dan mampu mengeliminasi polutan fenol dalam POMSE secara efektif, dimana kinerja degradasi senyawa organik dari fotokatalis TiO_2 sebesar 31,36 % dan eliminasi fenol hingga 96,66% (*loading* $\text{TiO}_2 = 1,5 \text{ g/L}$; laju alir udara = 10 cc/min) pada menit ke 120. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kinerja fotokatalis TiO_2 dalam mendegradasi senyawa organik cukup stabil pada rentang 25,25 – 31,36% selama dua jam (COD POMSE sebesar 250 hingga 650 ppm).

Kata Kunci

Palm Oil Mill Secondary Effluent, Fotokatalis, TiO_2 , Senyawa Organik, Fenol.

Abstract

*Degradation of organic compound on palm oil mill secondary effluent by photocatalytic process using TiO_2 photocatalysts with aeration of air has been carried out in the semi batch photo-reactor system equipped with mercury 350 W lamps. The concentration of organic compounds in POMSE was analyzed by UV-Vis Spectrophotometer. Photodegradation performance test showed that TiO_2 photocatalyst was able to degrade organic compounds and could eliminate phenol pollutants in POMSE effectively, where the degradation performance of organic compound from TiO_2 photocatalyst was respectively 31.36% and phenol elimination up to 96.66% (*loading* $\text{TiO}_2 = 1.5 \text{ g/L}$, air flow rate = 10 cc/min) at minutes-120. The result also showed that the performance of TiO_2 photocatalyst in degrading organic compound was stable at 25.25 to 31.36% for two hours (COD POMSE of 250 to 650 ppm).*

Keywords

Palm Oil Mill Secondary Effluent, Photocatalyst, TiO_2 , Organic Compound, Phenol.

Pendahuluan



OME (*Palm Oil Mill Effluent*) atau limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) merupakan limbah cair yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit. POME memiliki warna coklat, bau yang tidak enak, pH asam dan memiliki kandungan COD yang tinggi. Agar memenuhi baku mutu lingkungan, POME perlu diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan. Pengolahan secara biologi telah diterapkan untuk mengolah POME. POME yang telah mengalami pengolahan secara biologi disebut POMSE (*Palm Oil Mill Secondary Effluent*). Sistem pengolahan limbah pada Pabrik Kelapa sawit (PKS) umumnya sangat sederhana, yakni berupa kolam-kolam penampung limbah cair yang berukuran besar dan berjumlah banyak. Meskipun sederhana dan relatif murah, sayangnya secara teknis kolam-kolam tersebut kurang dioperasikan dan dipelihara dengan benar dan baik, akibatnya kolam-kolam tersebut hanya menjadi tempat penampung sementara sebelum akhirnya limbah cair tersebut mengalir dan terbuang ke badan sungai (Rahardjo, 2006). Hal ini tentunya akan membahayakan kehidupan air dan manusia karena masih banyaknya bahan pencemar yang belum memenuhi baku mutu lingkungan memasuki badan air, serta akan menimbulkan masalah eutrofikasi. Oleh karena itu jelas bahwa pengolahan secara biologi tidak cukup untuk menangani POME.

Semikonduktor fotokatalis merupakan *smart materials* yang menjanjikan untuk diaplikasikan dalam mendegradasi polutan organik, purifikasi udara dan air, serta proses sterilisasi. Salah satu semikonduktor yang dipakai dalam proses fotokatalisis adalah titanium dioksida (TiO_2). Beberapa keuntungan fotokatalis TiO_2 yakni efisiensi katalisis yang tinggi, hemat energi, biaya relatif rendah, tidak beracun dan tidak mengeluarkan polusi (Fujishima, Rao & Tryk, 2000).

Penelitian tentang penggunaan TiO_2 untuk mengolah limbah cair kelapa sawit telah berhasil dilakukan. Beberapa di antaranya adalah fotomineralisasi POME dengan menggunakan fotokatalis TiO_2 di bawah sinar UV oleh Hoong & Cheng (2015). Penelitian ini menggunakan POME dari *settling pond* yang diencerkan dan ditambahkan TiO_2 . Campuran yang berbentuk *slurry* selanjutnya difotokatalisis di bawah cahaya UV dalam sistem reaktor kedap udara. Hasil menunjukkan bahwa senyawa organik dalam POME dapat didegradasi hingga mencapai 52% selama 240 menit dengan pengisian (*loading*) katalis sebesar 1 g/L. Selain itu penambahan aerasi berupa O_2 murni ke dalam sistem reaktor mampu meningkatkan kinerja TiO_2 . Aqilah *et al.* (2013) mendegradasi senyawa organik dalam POMSE menggunakan sistem UV/Ferrioksalat/ TiO_2/O_3 . Sampel POMSE diambil dari kolam terakhir pengolahan limbah Pabrik Kelapa Sawit. Fotokatalisis dilakukan dalam sebuah reaktor silinder dilengkapi dengan lampu UV. Hasil degradasi senyawa organik ditunjukkan dengan penurunan persentase COD sebesar 54%. Sayangnya kedua penelitian tersebut menggunakan oksigen murni dan ozonator yang biayanya cukup mahal. Oleh karenanya untuk mempermudah aplikasinya di lapangan dalam penelitian ini digunakan aerasi berupa udara.

Indriana Lestari

Degradasi Senyawa
Organik pada *Palm Oil
Mill Secondary Effluent*
Menggunakan
Fotokatalis TiO_2

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan takaran *loading* katalis TiO₂ yang optimal dan efisiensi katalis dalam mendegradasi senyawa organik pada POMSE menggunakan aerasi berupa udara. Efisiensi katalis ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai COD POMSE selama fotokatalisis yang dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\% C = \left(\frac{C_o - C_a}{C_o} \right) \times 100\% \quad (1)$$

dimana:

C = penurunan COD (%)

C_o = konsentrasi COD awal (ppm)

C_a = konsentrasi COD akhir (ppm)

Metodologi

Bahan

Limbah cair berupa POMSE diambil dari kolam fakultatif salah satu PKS yang ada di Provinsi Jawa Barat, Indonesia. POMSE disimpan dalam botol coklat kaca untuk menghindari kontak dengan sinar matahari selama pengangkutan, dan pengisian wadah dibuat kedap udara untuk menghindari reaerasi. Sebelum digunakan sampel limbah disaring menggunakan kertas saring Whatman 42 untuk menghilangkan padatan-padatan terlarut agar tidak mengganggu saat analisa dengan spektrofotometer dan disimpan pada suhu 4°C. pH sampel adalah 7.

Fotokatalis TiO₂ P25 didapatkan dari *Evonic Industries*, terdiri dari 79% kristal anatase dan 21% kristal rutile, memiliki luas permukaan sebesar 53,6 m²g⁻¹ dengan ukuran partikel rata-rata sebesar 21 nm .

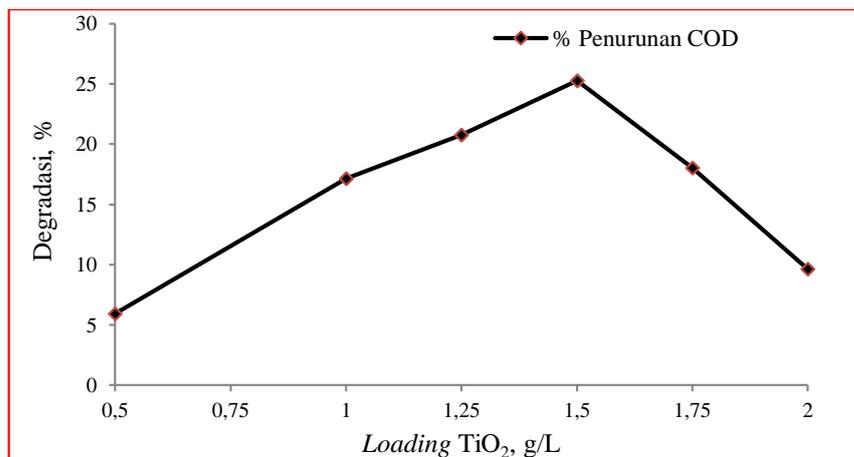
Fotokatalisis Degradasi Senyawa Organik pada POMSE

Pengujian kinerja fotokatalis dilakukan dengan mengamati kinerja fotokatalis dalam mengeliminasi senyawa organik pada sampel limbah. Proses fotokatalisis dilakukan pada suatu silinder uji tertutup (reaktor) yang dilapisi dengan aluminium foil. Dalam kotak tersebut, terdapat 1 buah gelas silinder borosilikat berukuran 600 mL, 1 buah lampu Mercury (PHILIPS HPL-N 350 W yang akan menjadi sumber energi bagi proses fotokatalisis. Reaktor dilengkapi dengan sebuah *magnetic stirrer* untuk memastikan reaksi berlangsung secara merata (homogen) dan *blower* untuk mengontrol suhu di dalam kontak uji. Reaktor bersifat *semi batch* dimana reaktan dan fotokatalis hanya dimasukkan pada saat reaksi belum dimulai. Setelah itu konsentrasi COD dalam POMSE akan menurun secara kontinu. Uji kinerja fotokatalis untuk mendegradasi senyawa organik akan dilakukan selama 120 menit lampu menyala. Sampel diambil setiap 60 menit sekali. Untuk mengetahui banyaknya senyawa organik yang terdegradasi selanjutnya sampel POMSE dilakukan analisa pengukuran COD. Sampel POMSE dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis (*Shimadzu UV-mini 1240*) untuk mengukur konsentrasi COD dan fenol yang terkandung di dalamnya, mengacu pada SNI 6989.2:2009 dan SNI 06-6989.21-2004.

Hasil dan Pembahasan

Pengaruh Variasi *Loading* Fotokatalis

Pengisian (*loading*) optimum katalis harus ditentukan untuk menghindari pemborosan katalis dan efisiensi total penyerapan foton. Percobaan degradasi fotokatalisis dilakukan dengan berbagai *loading* katalis mulai dari 0,5 g/L hingga 2 g/L. Pada uji fotodegradasi ini ditambahkan udara dengan laju 10 cc/min, dan nilai COD awal POMSE dijaga 550 – 600 ppm, hal ini sesuai dengan nilai aktual dari COD POMSE di kolam fakultatif.



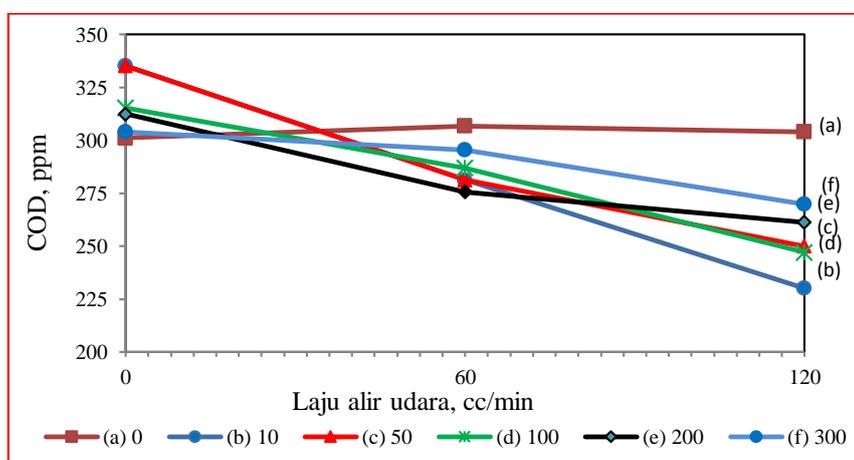
Gambar 1 Pengaruh *Loading* TiO₂ Terhadap Persentase Penurunan COD (Nilai COD Awal 550-600 ppm; Laju Alir Udara 10 cc/min; Waktu Fotokatalisis 120 menit)

Gambar 1 menunjukkan bahwa pada rentang *loading* katalis 0,5 sampai dengan 1,5 g/L aktivitas fotokatalis meningkat seiring dengan peningkatan *loading* katalis. Hal ini dikarenakan peningkatan *loading* katalis akan menambah jumlah sisi aktif fotokatalisis, sehingga meningkatkan jumlah polutan organik yang terserap di permukaan katalis untuk didegradasi. Selain itu, meningkatnya *loading* katalis akan meningkatkan generasi radikal hidroksil yang dibutuhkan untuk mengoksidasi polutan organik. Namun ketika *loading* katalis ditingkatkan hingga di atas titik optimal (> 1,5 g/L) linearisasi antara *loading* katalis dan penurunan COD tidak lagi terjadi bahkan cenderung menurun seiring dengan meningkatnya *loading* katalis. Hal ini disebabkan semakin banyak fotokatalis yang di masukkan ke dalam sistem *slurry* menyebabkan suspensi menjadi semakin keruh, sehingga mengakibatkan terjadinya efek *shading*. Kondisi ini tentunya tidak diinginkan, karena efek *shading* akan menghalangi penetrasi cahaya ke dalam larutan, mengakibatkan pembentukan elektron dan *hole* tidak terjadi secara efektif dan pada akhirnya mengganggu proses fotokatalisis. Selain itu penambahan katalis dalam jumlah yang banyak ke dalam suspensi akan mengakibatkan fotokatalis cenderung untuk beraglomerasi, yang berakibat pada penurunan luas permukaan aktif katalis, sehingga bidang kontak antara polutan organik dan katalis menjadi berkurang dan degradasi polutan organik menurun. Thota *et al.* (2014) juga menyatakan

bahwa peningkatan dosis (*loading*) katalis umumnya meningkatkan jumlah foton yang diserap oleh katalis, yang pada akhirnya meningkatkan generasi elektron dan *hole*, dengan demikian jumlah radikal hidroksil meningkat. Selain itu, peningkatan dosis katalis meningkatkan jumlah polutan organik yang terserap dan memfasilitasi aktivitas fotokatalitik. Namun, dosis katalis yang berlebihan akan mengakibatkan aktivitas fotokatalitik menurun karena terjadinya kekeruhan (*turbidity* meningkat), sehingga terjadi pembatasan terhadap penetrasi cahaya, dan cenderung terjadi aglomerasi partikel katalis. *Loading* katalis yang tinggi secara signifikan mempengaruhi dispersi cahaya. Berdasarkan hasil yang diperoleh, *loading* optimum katalis TiO₂ yang digunakan untuk proses fotokatalis POMSE adalah 1,5 g/L. Pada konsentrasi ini COD dapat diturunkan hingga 25,25 % dan disekitar *loading* ini penurunan konsentrasi COD tidak terlalu signifikan.

Pengaruh Variasi Laju Alir Udara

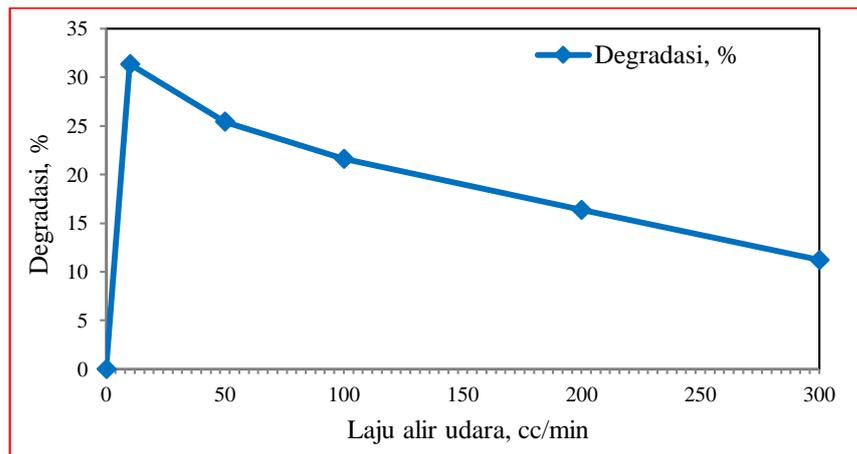
Peningkatan degradasi polutan organik dalam POMSE, dilakukan dengan menambahkan sejumlah udara ke dalam system *slurry* dan dampak yang dihasilkan terhadap efisiensi penurunan nilai COD telah diselidiki berdasarkan hasil penelitian berikut ini. Laju alir udara divariasikan dari 0 sampai 300 cc/min. Gambar 2 dan 3 memperlihatkan profil penurunan COD yang diukur dengan berbagai laju udara yang ditambahkan ke dalam sistem.



Gambar 2 Pengaruh Penambahan Laju Alir Udara Terhadap Persentase Penurunan COD (Nilai COD Awal 300-350 ppm; *Loading* TiO₂ = 1,5 g/L)

Gambar 2 (a) dan 3 menunjukkan bahwa ketika tidak ada penambahan udara ke dalam sistem fotokatalisis, penurunan COD tidak teramati, dan cenderung naik seiring dengan bertambahnya waktu fotokatalisis. Asumsi yang dapat diberikan adalah sebagian besar elektron yang digenerasi dari eksitasi elektron pada pita valensi ke pita konduksi tidak dikonsumsi, sehingga elektron berekombinasi kembali dengan *hole*, yang mengakibatkan sedikit sekali radikal hidroksil digenerasi untuk mendegradasi polutan. Asumsi selanjutnya adalah adanya pengurangan

volume limbah akibat pengambilan sampel dan proses penguapan selama fotokatalisis. Pengurangan volume dalam sistem mengakibatkan konsentrasi suspensi menjadi sedikit pekat dan menyebabkan pembacaan nilai COD naik, karena pengukuran COD didasarkan pada volume larutan. Asumsi lainnya adalah polutan organik pada dasarnya telah teroksidasi, namun membentuk senyawa *intermediate* yang berupa senyawa organik turunannya, sehingga pada saat dianalisis akan terbaca sebagai COD.



Gambar 3 Pengaruh Variasi Laju Alir Udara Terhadap Persentase Penurunan COD (Nilai COD Awal 300-350 ppm; *Loading* TiO₂ = 1,5 g/L)

Gambar 2 (b) dan 3 menunjukkan bahwa, saat udara sebesar 10 cc/min ditambahkan ke dalam sistem, terjadi penurunan COD yang cukup signifikan (31,36%). Hal ini dikarenakan elektron yang tereksitasi pada pita konduksi akan dikonsumsi oleh oksigen dalam udara untuk membentuk radikal superoksida maupun radikal hidroksil, sehingga rekombinasi elektron dan *hole* dapat dicegah yang tentunya akan meningkatkan aktivitas fotokatalisis. Pernyataan ini diperkuat oleh (Dijkstra *et al.*, 2001) bahwa perlakuan aerasi meningkatkan jumlah oksigen terlarut pada sampel uji. Oksigen tersebut mengambil peran sebagai *electron scavenger* sehingga laju rekombinasi pada fotokatalis dapat berkurang. Selain itu, adanya penambahan udara akan meningkatkan turbulensi (pengadukan), sehingga kontak antara polutan dan katalis menjadi lebih banyak. Lam *et al.* (2010) menyatakan bahwa adanya perlakuan aerasi menyebabkan turbulensi pada sampel uji yang dapat menimbulkan efek pengadukan yang lebih baik. Turbulensi pada sampel uji dapat meningkatkan laju transfer massa dari polutan pada katalis, sehingga kontak antara keduanya menjadi lebih banyak (Lam *et al.*, 2010; Wong *et al.*, 2011).

Namun demikian, pemberian udara dengan laju melebihi 10 cc/min (Gambar 3) tidak meningkatkan kinerja fotodegradasi dari katalis, dimana persen penurunan COD kecil semakin menurun. Hal ini dikarenakan peningkatan laju alir akan diikuti dengan peningkatan jumlah gelembung udara yang terbentuk, dimana gelembung-gelembung tersebut menyebabkan efek *shading* yang menghalangi iluminasi cahaya

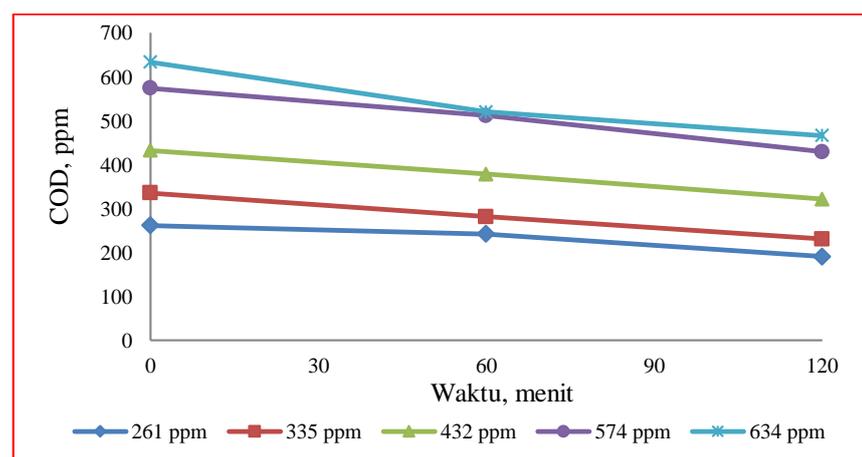
(foton) untuk sampai pada permukaan katalis, sehingga aktivitas fotokatalis terganggu. Selain itu kandungan udara yang sebagian besar adalah gas nitrogen tidak memberikan pengaruh yang signifikan meskipun pasokan udara ditambahkan, karena yang berperan dalam fotokatalisis adalah gas oksigen dan kehadiran nitrogen yang bersifat inert justru akan memberikan efek *boundary layer* katalis terhadap polutan. Menurut Lam *et al.* (2010) dan Wong *et al.* (2011) penggunaan laju alir udara yang melebihi laju alir tertentu (titik optimal) akan menurunkan kemampuan adsorpsi senyawa polutan ke permukaan fotokatalis, sehingga melemahkan proses fotokatalisis dalam mendegradasi senyawa polutan. Berdasarkan penelitian ini, laju alir optimum udara untuk mendukung proses fotokatalisis yang lebih baik adalah sebesar 10 cc/min.

Pengaruh Konsentrasi Awal Limbah

Setelah mendapatkan optimalisasi terhadap *loading* katalis sebesar 1,5 g/L dan laju udara 10 cc/min, langkah selanjutnya adalah melihat pengaruh konsentrasi COD mula-mula (awal) limbah terhadap efisiensi kinerja fotokatalis. Konsentrasi awal COD dibuat bervariasi dari 250 hingga 650 ppm. Tabel berikut ini dan Gambar 4 merupakan profil efek variasi konsentrasi awal terhadap persentase penurunan nilai COD.

Tabel 1 Persentase Degradasi Polutan Organik Terhadap Nilai COD Awal POMSE

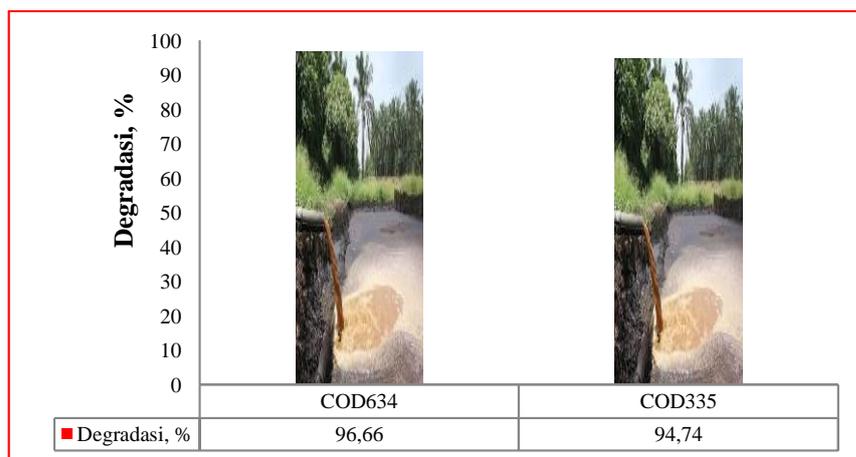
COD awal (ppm)	Degradasi Polutan Organik (%)
261	27,17
335	31,36
432	25,66
574	25,25
634	26,46



Gambar 4 Pengaruh Nilai COD Awal Limbah Terhadap Kinerja Degradasi Fotokatalisis (*Loading* TiO₂ = 1,5 g/L; Laju Alir uUdara = 10 cc/min; Waktu Fotokatalisis 120 menit)

Tabel 1 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa persentase penurunan nilai COD limbah dengan konsentrasi awal berkisar 250 hingga 650 ppm

relatif sama. Artinya dengan rentang nilai COD awal sebesar 650 atau di bawahnya, kinerja katalis titania relatif sama, cukup baik dengan kisaran persentase penurunan COD 25,25 hingga 31,36%. Hal ini juga menunjukkan bahwa kemampuan degradasi polutan organik yang dimiliki katalis TiO₂ berkisar 25,25 hingga 31,36% selama dua jam. Asumsi yang bisa diberikan dari hasil ini adalah selama kurun waktu 120 menit, polutan-polutan organik yang jumlahnya sekitar 25 hingga 30 % dari total polutan organik telah termineralisasi. Sedangkan sisanya yang merupakan senyawa kompleks (lignin, asam amino, pektin) dan sebagian fenol masih dalam tahapan depolimerisasi membentuk molekul dengan bobot molekul yang lebih kecil (mikromolekul) sebagai senyawa *intermediate*, yang mana untuk mineralisasi total memerlukan waktu yang lebih lama. Hal ini didasarkan pada pengamatan visual terhadap warna POMSE (diduga dari lignin) sebelum dan sesudah 120 menit fotokatalisis tidak memberikan perubahan warna yang signifikan. Pernyataan ini diperkuat dengan penelitian yang dilakukan oleh Chang et al., (2004) dengan kondisi pH yang sama (7 hingga 8) untuk dapat mendegradasi lignin hingga 88% dibutuhkan waktu degradasi selama 960 menit, dengan konsentrasi fotokatalis TiO₂ sebesar 10 g/L tanpa penambahan udara. Dalam kaitannya dengan degradasi Asam amino, Tran et. al. (2006) menyatakan bahwa degradasi Asam amino dipengaruhi oleh struktur molekul penyusunnya (khususnya rantai samping) dan interaksi antara rantai samping Asam amino dengan permukaan katalis yang bervariasi terhadap pH. Sehingga tidak semua asam amino dapat didegradasi pada pH yang sama. Namun, hasil yang berbeda diperoleh ketika dilakukan analisis terhadap fenol. Konsentrasi fenol di awal dan di akhir fotokatalisis menunjukkan penurunan yang sangat signifikan yakni sebesar 94,74 dan 96,66% fenol dapat diturunkan dalam POMSE pada konsentrasi COD awal yang berbeda. Penurunan konsentrasi fenol dapat dilihat pada Gambar 5. Pengamatan khusus pada fenol ini dilakukan karena fenol merupakan senyawa berbahaya (toksik) dibandingkan dengan senyawa organik lainnya yang terkandung pada POMSE.



Gambar 5 Penurunan Fenol Selama 120 menit Fotokatalisis (*Loading* TiO₂ = 1,5 g/L; Laju Alir uUdara 10 cc/min)

POMSE dengan COD awal sebesar 634 ppm mengandung fenol 13 ppm, dan setelah 120 menit fotokatalisis, konsentrasi fenol turun menjadi 0,43 ppm. Selain itu POMSE dengan COD awal sebesar 335 ppm mengandung fenol 6 ppm, dan setelah 120 menit fotokatalisis, konsentrasi fenol turun menjadi 0,32 ppm. Berdasarkan perhitungan menggunakan analisis COD, total fenol yang didegradasi dari keseluruhan COD 634 ppm adalah sebesar 5% (13 ppm fenol sebanding dengan 30 ppm COD). Artinya ada sekitar 20 hingga 25% polutan organik lainnya yang diduga merupakan gabungan dari senyawa-senyawa organik seperti asam lemak bebas, lignin, pektin dan Asam amino telah termineralisasi. Pada dasarnya reaksi radikal bebas hidroksil bersifat tidak selektif, sehingga ada yang menyerang fenol, adapula yang menyerang polutan organik lainnya dan ketika hampir semua fenol termineralisasi, maka radikal hidroksil yang terbentuk akan mengoksidasi polutan organik lainnya pada POMSE. Berdasarkan hal tersebut asumsi yang dapat diberikan adalah sekitar 70% polutan yang belum termineralisasi adalah senyawa-senyawa intermediet dari degradasi lignin, asam amino, fenol, pektin, minyak dan *grease*, serta makromolekul itu sendiri yang merupakan komponen-komponen penyusun polutan organik pada POMSE. Namun demikian, meskipun COD hanya mampu diturunkan sebesar 25,25 hingga 31,36 %, namun fenol yang merupakan zat berbahaya karena bersifat racun dan sulit didegradasi oleh organisme pengurai, mampu diturunkan hingga di bawah baku mutu lingkungan (0,5 ppm).

Penutup

Kesimpulan

Loading katalis titania dan laju udara optimal untuk menurunkan COD pada POMSE berturut-turut adalah 1,5 g/L dan 10 cc/min, dengan 31,36 % polutan organik dapat dimineralisasi oleh katalis TiO₂ P25.

Kemampuan katalis TiO₂ P25 dalam menurunkan nilai COD pada rentang 200 hingga 600 ppm berkisar antara 25,25 hingga 31,36% dan katalis titania mampu menurunkan konsentrasi fenol yang merupakan senyawa toksik dalam POMSE hingga 96,66%.

Saran

Mengarah pada aplikasi lapangan, khususnya dalam proses separasi (*recovery*) fotokatalis dari limbah yang di-treatment perlu dilakukan penelitian pengkompositan fotokatalis dengan material lain misalnya dengan material yang bersifat magnet atau yang bersifat tetap (imobilisasi) dan bagaimana pengaruh pengkompositan tersebut terhadap kinerja fotokatalis dalam mendegradasi senyawa organik dalam POMSE.

Selain itu untuk mengatasi rendahnya kemampuan adsorpsi fotokatalis TiO₂ dapat dilakukan dengan mengkomposisikan fotokatalis dengan material lain yang memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi atau merubah struktur fotokatalis.

Daftar Pustaka

- Anonimous. (2004). *Air dan Air Limbah – Bagian 21: Cara uji kadar fenol secara spektrofotometri*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Anonimous. (2009). *SNI 6989.2:2009 Tentang Air dan Air Limbah – Bagian 2: Cara uji kebutuhan oksigen kimiawi (Chemical Oxygen Demand, COD) dengan refluk tertutup secara spektrofotometri*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Aqilah, N., Fadzil, M., Zainal, Z., & Abdullah, A.H. (2013). COD Removal for Palm Oil Mill Secondary Effluent by Using UV/Ferrioxalate/TiO₂/O₃ system. *IJETAE*, 3(7), 237-243.
- Chang, C.N., Ma, Y.S., Fang, G.C., Chao, A.C., Tsai, M.C., & Sung, H.F. (2004). Decolorizing of lignin wastewater using the photochemical UV/TiO₂ process. *Chemosphere*, 56(10), 1011-1017.
- Dijkstra, M.F.J., Michorius, A., Buwalda, H., Panneman, H.J., Winkelman, J.G.M., & Beenackers, A.A.C.M. (2001). Comparison of the efficiency of immobilized and suspended systems in photocatalytic degradation, *Catalysis Today*, 66, 487-494.
- Fujishima, A., Rao, T.N., & Tryk, D.A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 1(1), 1-21.
- Hoong, K.N., & Cheng, C.K. (2015). A novel photomineralization of POME over UV-responsive TiO₂ photocatalyst: kinetics of POME degradation and gaseous product formations. *RSC Adv.*, 5(65), 53100-53110.
- Lam, S.M., Sin, J.C., & Mohamed, A.R. (2010). Parameter effect on photocatalytic degradation of phenol using TiO₂-P25/activated carbon (AC). *Korean Journal of Chemical Engineering*, 27(4), 1109-1116.
- Rahardjo, P.N., (2006). *Teknologi Pengelolaan Limbah Cair Yang Ideal*. 2(1).
- Thota, S., Tirukkovalluri, S.R., & Bojja, S. (2014). Visible Light Induced Photocatalytic Degradation of Methyl Red with Codoped Titania. *Journal of Catalysts*. 1-7.
- Tran, T.H., Nosaka, A.Y., & Nosaka, Y. (2006). Adsorption and photocatalytic decomposition of amino acids in TiO₂ photocatalytic systems. *The Journal of Physical Chemistry. B*, 110(50), 25–31.
- Wong, C.L., Tan, Y.N., & Mohamed, A.R. (2011). Photocatalytic Degradation of Phenol Using Immobilized TiO₂ Nanotube Photocatalysts. *Journal of Nanotechnology 2011*, 1-9.

Indriana Lestari

Degradasi Senyawa
Organik pada *Palm Oil
Mill Secondary Effluent*
Menggunakan
Fotokatalis TiO₂
