

Reuse Air Limbah Industri Kecap Dengan Teknologi Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) Dan Filtrasi Secara Realtime Dan Online

Rame¹⁾, Novarina Irnaning Handayani ²⁾

^{1,2}Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, Badan Penelitian dan Pengembangan Industri, Kementerian Perindustrian

¹Email : rameatmopawiro@gmail.com

²Email : nova.bbtppi@yahoo.com

Abstrak – Air olahan IPAL pada industri kecap secara umum masih berwarna coklat kekuningan meskipun sudah memenuhi baku mutu air limbah. Teknologi IPAL terpasang saat ini masih belum efektif dalam penghilangan warna air limbah pada industri kecap. Pada dasarnya air limbah merupakan suatu sumber daya yang masih memungkinkan untuk dimanfaatkan lagi. Untuk mendapatkan efisiensi penghancuran senyawa polutan organik dan mikroorganisme, ada dua pendekatan teknologi reuse yang digunakan yaitu ozonasi katalitik dan filtrasi. Untuk menghilangkan padatan tersuspensi dan kekeruhan dilakukan dengan proses filtrasi dengan filter polysulfone $\pm 1,2 \mu$ ($\pm 30 \text{ lpm}$). Untuk meningkatkan efisiensi proses katalitik bisa dilakukan variasi jenis katalis dan desain reaktor. Selanjutnya proses filtrasi dilakukan untuk penghilangan polutan lainnya menggunakan filter nylon $\pm 0,5 \mu$ ($\pm 15 \text{ lpm}$). Untuk mendapatkan hasil proses reuse yang memenuhi persyaratan kualitas maka unit reuse dioperasikan secara terintegrasi dengan monitoring dan pengendalian kualitas air efluen yang diolah secara online dan realtime. Integrasi memungkinkan operasional reuse lebih efisien dengan injeksi dosis oksidator dan waktu kontak sesuai karakteristik air olahan IPAL sebagai input. Produk unit reuse diharapkan dapat digunakan kembali untuk kebutuhan industri sehingga mendatangkan keuntungan materi dan keuntungan dari sisi lingkungan.

Kata Kunci : reuse, air limbah, industri kecap, mobile ozonasi katalitik, filtrasi

PENDAHULUAN

Kementerian Perindustrian memiliki fokus memacu kinerja ekspor di lima sektor industri yang mendapatkan prioritas pengembangan sesuai peta jalan Making Indonesia 4.0. Lima sektor itu, yakni industri makanan dan minuman, tekstil dan pakaian, otomotif, elektronika, dan kimia. Sebab, lima kelompok manufaktur ini mampu memberikan kontribusi sebesar 65 persen terhadap total nilai ekspor nasional. Selain itu bisa menyumbang 60 persen untuk PDB dan 60 persen tenaga kerja industri ada di lima sektor tersebut.

Industri makanan dan minuman di Indonesia merupakan salah satu dari lima sektor industri prioritas yang menjadi motor penggerak ekonomi nasional. Saat ini terdapat 100 unit usaha industri kecap skala menengah-besar. Nilai produksi kecap Rp 7,1 triliun dengan serapan tenaga kerja sebesar 8.500 orang pada tahun 2014 (Kemenperin, 2015).

Dalam sebuah proses industri selain menghasilkan produk industri, dampak proses tersebut adalah menghasilkan limbah. Adapun jenis limbah bisa berupa air limbah, emisi gas

buang, dan limbah padat. Dari proses industri untuk menghasilkan produk kecap 1 ton menghasilkan air limbah sampai dengan 10 m³. Sehingga dalam satu tahun industri dengan produk kecap 1 ton akan menyumbangkan air limbah sampai dengan 3.650 m³/tahun. Nilai produksi kecap Rp 7,1 triliun (asumsi harga Rp 40.000,- per liter) akan akan menyumbangkan air limbah sampai dengan 647.875.000 m³ pada tahun 2014. Inilah yang menjadi permasalahan proses produksi di industri kecap, yaitu dampak ikutan berupa air limbah dengan debit relatif tinggi.

Air olahan IPAL pada industri kecap secara umum masih berwarna coklat kekuningan meskipun sudah memenuhi baku mutu air limbah. Teknologi IPAL terpasang saat ini masih belum efektif dalam penghilangan warna air limbah pada industri kecap.

Masalah pencemaran lingkungan oleh air limbah industri, khususnya dikota besar saat ini sudah sampai pada tahap yang mengkhawatirkan. Beban polutan yang dibuang ke badan air atau sungai sudah sampai pada batas dimana alam atau lingkungan sudah tidak mampu lagi

melakukan pemurnian secara alami. Dampaknya antara lain dapat disaksikan terjadinya pengotoran sungai-sungai di Indonesia, dari hulu sampai ke muara. Salah satu sumber pencemar adalah dari kegiatan industri sebagai penyebab perusak lingkungan, selain dari kegiatan domestik (Kemen LHK, 2015).

Beberapa industri mengalami kekurangan dalam pemenuhan kebutuhan air untuk proses produksi, karena ijin penggunaan air dari sumber ditolak oleh pemerintah setempat. Sementara itu sumber air baru yang ada tidak dapat mencukupi kebutuhan karena debitnya yang makin kecil. Meskipun industri telah mempunyai IPAL, tetapi air hasil olahannya masih belum dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan industri. Untuk itu maka diperlukan unit reuse air hasil olahan IPAL tersebut agar dapat meningkatkan kualitas air olahan IPAL sehingga memenuhi persyaratan untuk penggunaan kembali (Kemen LHK, 2018).

Pada dasarnya air limbah merupakan suatu sumber daya yang masih memungkinkan untuk dimanfaatkan lagi. Air limbah mempunyai nilai/uang yang terbuang. Pengolahan air limbah adalah proses pendegradasian air limbah yang memerlukan energi. Pengolahan air limbah memerlukan biaya. Dengan mengendalikan kedua hal ini dimungkinkan untuk melakukan reuse air limbah yang dapat mendatangkan keuntungan materi dan keuntungan dari sisi lingkungan (Kusminah, 2018).

Di dalam aplikasi reuse air limbah industri memerlukan tingkat proses pengolahan sampai mencapai tingkat kualitas tertentu sesuai dengan rencana penggunaannya. Beberapa aplikasi reuse air limbah industri dapat digunakan untuk berbagai keperluan antara lain untuk irigasi pertanian; penggunaan untuk industri seperti pendingin, umpan boiler, air proses, pekerjaan konstruksi; keperluan umum seperti air pemadam kebakaran, air pendingin udara, air bilas toilet; suplai air bersih seperti penambahan pada reservoir air bersih dan suplai ke dalam perpipaan air bersih; dan lain-lain (Said, 2006).

Persyarat

an kualitas air reuse air limbah bermacam-macam tergantung pada jenis pemakaiannya. Teknologi reuse air limbah secara teoritis sama dengan teknologi yang digunakan untuk pengolahan air minum atau air limbah. Namun diperlukan proses pengolahan tambahan untuk menghilangkan warna, sisa polutan organik kompleks dan penghancuran mikroorganisme pada air olahan IPAL.

METODE

Untuk menjawab permasalahan tersebut diatas, maka tipe penelitian adalah penelitian eksperimental. Objek penelitian adalah air olahan IPAL industri kecap. Teknik pengumpulan data menggunakan uji coba, observasi dan studi pustaka.

Penggunaan Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) memiliki potensi penghematan yang signifikan dan karena itu bernilai bagi industri. Untuk air limbah industri kecap yang akan diteliti, parameter warna akan digunakan sebagai parameter utama untuk Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) karena secara signifikan lebih cepat. Selain itu, dosis ozon yang hemat biaya dicapai karena hanya ozon yang diperlukan untuk memenuhi batas penghilangan warna terkait yang digunakan. Kemungkinan penghematan dalam biaya operasional akan diperoleh dalam mengoperasikan reuse air limbah industri kecap dengan teknologi Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) dan filtrasi secara realtime dan online. Untuk mendapatkan efisiensi penghancuran senyawa polutan organik dan mikroorganisme, ada dua pendekatan teknologi reuse yang digunakan yaitu ozonasi katalitik dan filtrasi. Untuk menghilangkan padatan tersuspensi dan kekeruhan dilakukan dengan proses filtrasi dengan filter polysulfone $\pm 1,2 \mu$ (± 30 lpm). Untuk meningkatkan efisiensi proses katalitik bisa dilakukan variasi jenis katalis dan desain reaktor. Selanjutnya proses filtrasi dilakukan untuk penghilangan polutan lainnya menggunakan filter nylon $\pm 0,5 \mu$ (± 15 lpm).

Ruang

lingkup penelitian ini adalah uji coba pengolahan air olahan IPAL industri kecap dengan Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) menggunakan sensor warna. Sistem Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) dan filtrasi secara realtime dan online dibandingkan dengan ozonasi saja dan ozonasi katalitik batch. Efisiensi proses pengolahan dilakukan dengan pengujian parameter warna di laboratorium. Data primer dari penelitian adalah kondisi operasi Reuse air limbah industri kecap dengan teknologi Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) dan filtrasi secara realtime dan online.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Air Limbah Industri Kecap

Teknologi pengolahan air limbah di industri kecap Indonesia, adalah pengolahan secara konvensional yang ditunjang oleh separasi sederhana yang meliputi teknologi anaerob dan teknologi aerob. Teknologi pengolahan air limbah tersebut salah satunya adalah kombinasi pengolahan biologi dan kimia. Dasar penetapan sebuah teknologi pengolahan air limbah di industri kecap awalnya tidak memperhatikan faktor-faktor tersedianya sumberdaya energi, sumberdaya air berkesinambungan, dan parameter warna. Hal ini disebabkan karena pada waktu itu, belum ada konsep teknologi ramah lingkungan, harga energi masih disubsidi oleh Pemerintah, dan sumberdaya air masih melimpah.

Penetapan teknologi pengolahan air limbah industri sepenuhnya menjadi kebijakan pelaku industri atau kebijakan berbasis kesadaran memenuhi persyaratan baku mutu. Sehingga Pemerintah tidak memiliki kewenangan dalam penentuan jenis teknologi pengolahan air limbah. Namun Pemerintah memiliki kewenangan regulasi dalam persyaratan pencapaian baku mutu kualitas air limbah industri. Namun industri yang hanya mementingkan keuntungan semata tanpa memperhatikan ketersediaan sumberdaya alam baik air dan udara serta energi, merupakan pandangan yang salah. Perbaikan lingkungan melalui pencegahan pencemaran air dan udara

akan

meningkatkan kesejahteraan pelaku industri dan masyarakat.

Proses pengolahan air limbah industri kecap di Indonesia sebagian besar menggunakan kombinasi teknologi yang telah ada. Kombinasi koagulasi/flokulasi, filtrasi, dan biologi aerob/anaerob. Bahan kimia untuk koagulasi/flokulasi sebagian besar menggunakan kombinasi aluminium sulphate, ferrous sulphate, lime, flokulan sintesis seperti polyacrylamide. Salah satu dampak dari penggunaan koagulasi/flokulasi adalah menghasilkan sludge yang berpotensi toksik. Selain itu, pemakaian bahan kimia yang tidak terkontrol akan berdampak pada peningkatan level toksik (Barbera, et.al., 2018). Apalagi penggunaan koagulasi/flokulasi saat ini belum dapat menghilangkan warna sehingga belum memenuhi baku mutu air limbah untuk reuse. Hal inilah yang menyebabkan koagulasi/flokulasi tidak ramah lingkungan dan ketergantungan pada bahan kimia tinggi.

Teknologi pengolahan air limbah industri dapat dibagi menjadi tiga kelompok. Pengolahan berbasis mikroorganisme, disebut sebagai kelompok biologi. Di mana mikroorganisme yang menghasilkan enzim yang spesifik akan mampu menguraikan pencemar organik dalam air limbah (Bui, et.al., 2018). Biaya operasional teknologi berbasis biologi relatif kecil namun cukup sulit untuk monitor dan kontrol kondisi pengolahan secara akurat. Sedangkan teknologi berbasis fisika, dilakukan dengan prosedur filtrasi, koagulasi / flokulasi, dan aerasi, serta sublimasi pelarut. Filtrasi tidak mengubah cemaran toksik. Koagulasi / flokulasi akan menghasilkan produk samping toksik sludge. Sedangkan aerasi terbatas untuk komponen volatil. Dan sublimasi akan menimbulkan kontaminasi udara. Kemudian pendekatan berbasis kimia menggunakan klorinasi dan saponifikasi/ekstraksi yang menghasilkan produk toksik. Sedangkan proses oksidasi lanjut dilakukan dengan fotokatalitik, proses fenton, kombinasi, dan ozonasi, serta ozonasi katalitik (Fei, et.al., 2018). Fotokatalitik memerlukan konsumsi energi yang relative tinggi; proses

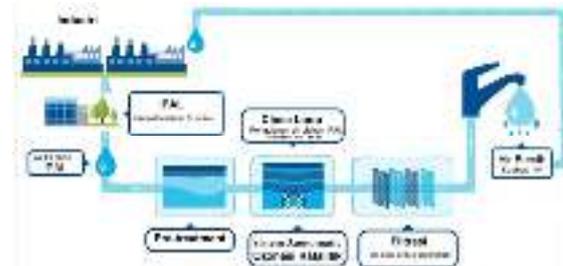
fenton berpotensi menghasilkan produk toksik; biaya operasional kombinasi metode relatif tinggi dan kurang efektif; ozonasi memerlukan konsumsi ozon relatif tinggi (Gottschalk, et.al., 2010). Ozonasi katalitik sebagai teknologi ramah lingkungan memiliki potensi sebagai solusi alternatif untuk meningkatkan kesadaran pelaku industri akan pentingnya menjaga lingkungan hidup dalam mengeksplorasi sumber daya alam dan energi.

Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat)

Efisiensi ozonasi katalitik pada air limbah yang diolah tergantung pada sejumlah faktor. Terutama adalah beban organik, laju aliran umpan dan waktu reaksi dalam reaktor katalitik serta jenis katalis (Aghaeinejad-Meybodi, et.al., 2019). Kinerja perlakuan dapat dikontrol sehubungan dengan beban umpan menggunakan dosis ozon spesifik. Pengukuran online parameter BOD₅ dan COD akan menjadi optimal untuk mengendalikan sistem ozonasi katalitik. Namun karena saat ini kedua parameter belum dapat diukur secara andal secara online dan harga sensor relatif tinggi, maka perlu untuk menemukan parameter yang dapat diukur. Untuk mengidentifikasi korelasi karakteristik umpan dan output, parameter warna dapat digunakan untuk tujuan kontrol. Jika air limbah yang diolah akan dikembalikan ke proses produksi, penghilangan warna sangat penting. Dalam literatur, belum tersedia informasi mengenai reuse air olahan IPAL industry kecap dengan menggunakan Mobile Ozonasi Katalitik(E-Sikat) menggunakan sensor warna.

Operasional unit reuse air limbah industri kecap dengan Mobile Ozonasi Katalitik(E-Sikat) dan filtrasi secara secara realtime dan online diharapkan dapat memenuhi persyaratan PP No 82 Tahun 2001 tentang pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran air; Permen LH No 5 Tahun 2014 tentang baku mutu air limbah; PP No 41 Tahun 1999. Air olahan yang dihasilkan oleh unit reuse diharapkan memenuhi standard kualitas dan dapat digunakan sebagai air flasing toilet, air siram taman, air untuk

kebersihan lingkungan dan air cuci kendaraan serta air cuci peralatan produksi maupun air proses produksi seperti tampak pada Gambar 1.

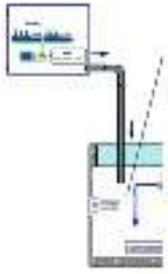


Gambar 1. Diagram reuse air limbah industri

Diagram proses Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) menggunakan sensor warna dapat dilihat pada Gambar 2. Kontroler memerintahkan buka tutup valve sesuai kebutuhan ozon dari pembacaan sensor. Volume ozon dikeluarkan dikonfirmasi dengan pembacaan dari sensor laju alir. Pembacaan warna dari sensor pada air input diolah oleh kontroler untuk menentukan jumlah Ozon yang dibutuhkan. Pembacaan sensor di akhir digunakan untuk analisis efektifitas proses. Kontroler terkoneksi dengan PC/ smartphone via WiFi. Reaktor katalis diletakkan di luar reaktro katalitik setelah venturi yang akan meningkatkan proses distribusi ozon sehingga dihasilkan kuantitas radikal hidroksil yang maksimal. Sedangkan Diagram proses Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) menggunakan sensor dengan katalis dalam reaktor katalitik dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Diagram proses Unit Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat)



Gambar 3. Diagram proses Unit Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat)

Perbandingan efisiensi proses penghilangan warna dengan input 2 liter air limbah industri kecap dapat diketahui melalui hasil pengujian air terolah yang ditunjukkan pada Tabel 1. Terlihat bahwa warna air limbah menunjukkan penurunan sebesar 55% setelah proses ozonasi saja selama 35 menit. Sedangkan waktu ozonasi katalitik batch untuk penghilangan warna air limbah sebesar 95% adalah 19 menit. Secara umum proses mobile ozonasi katalitik menunjukkan efisiensi penghilangan warna terbaik yaitu untuk penghilangan warna air limbah sebesar 95% adalah 11 menit.

Tabel 1. Perbandingan efisiensi dan waktu proses reuse dengan input 2 liter air limbah industri kecap

No	Proses reuse	Waktu (menit)	Efisiensi (%)
1	Ozonasi	35	55
2	Ozonasi katalitik batch	19	95
3	Mobile ozonasi katalitik	11	95

Ozonasi katalitik dapat mengurangi senyawa sintetik, senyawa organik, dan warna pada air limbah (Fang, et.al., 2019). Selama ozonasi, molekul O_3 mengoksidasi molekul organik melalui reaksi radikal selektif (Han, et.al., 2018) atau non-selektif. Molekul O_3 juga menyerang ikatan kromofor tak jenuh secara selektif melalui

substitusi elektrofilik (Zhao, et.al., 2019) atau non-selektif melalui pembentukan radikal hidroksil (OH^*) ($E_0 = 2,8$ eV), menghasilkan penghilangan warna diikuti oleh degradasi molekul organik yang kompleks yang tidak terurai secara biologis (Ghuge, et.al., 2018). Penelitian terbaru menunjukkan Ozonasi katalitik dapat meningkatkan konsentrasi radikal hidroksil sehingga dapat meningkatkan mineralisasi cemaran organik termasuk warna kompleks (Poznyak, et.al., 2019).

Penurunan intensitas warna melalui ozonasi katalitik lebih cepat dibandingkan ozonasi saja. Pada mobile ozonasi katalitik memberikan penurunan intensitas warna terbaik. Kuantitas radikal hidroksil sangat efektif untuk menguraikan warna (Kolosov, et.al., 2019).

Warna karamel dalam air limbah industri kecap merupakan campuran kompleks senyawa yang dihasilkan oleh pemanasan karbohidrat di bawah panas terkendali (karamelisasi) dan kondisi pemrosesan sulit dihilangkan dengan proses konvensional. Air yang keluar dari proses industri kecap mengandung komponen organik, zat warna dan bahan pembantu yang membuat air berpotensi beracun dan dapat merusak lingkungan jika komponen ini tidak dihilangkan. Selain itu, air limbah industri kecap memiliki rasio BOD/COD yang rendah sehingga memiliki indeks biodegradabilitas yang rendah. Oleh karena itu, bahkan setelah pengolahan primer, sekunder, dan tersier menggunakan proses pengolahan konvensional, dekolourisasi dan indeks biodegradasi masih rendah. Reuse menggunakan ozonasi katalitik merupakan salah satu pendekatan yang efektif dalam penghilangan sisa cemaran tersebut (Yang, et.al., 2019).

Ozonasi katalitik efektif pada molekul organik namun membutuhkan jumlah dan jenis katalis optimal (Li, et.al., 2019). Mobile ozonasi katalitik memungkinkan dosis ozon dengan tepat sesuai dengan kuantitas warna yang harus dihilangkan. Meskipun jalur mekanisme ozonasi katalitik bervariasi sesuai dengan katalis dan molekul organik (Ren, et.al., 2018), namun

pemanfaatan

n sensor warna akan menghasilkan air terolah sesuai dengan nilai yang ditetapkan dalam sistem. Ozon yang terserap, terlarut, dan tersebar berkontribusi terhadap degradasi molekul organik (Sable, et.al., 2015).

Ozonasi katalitik melibatkan serangan langsung radikal hidroksil pada molekul organik yang menghasilkan radikal organik dan air (Tan, et.al., 2017). Oksidasi katalitik polutan organik dapat menghasilkan total mineralisasi menjadi CO₂ dan air, tetapi hanya jika jumlah katalis dan zat pengoksidasi, dan konsentrasi substrat organik dalam rasio optimal (Wang, et.al., 2017). Katalis dapat meningkatkan dekomposisi O₃ untuk membentuk radikal hidroksil (Xu, et.al., 2016). Dengan menggunakan mobile ozonasi katalitik akan menghasilkan penghilangan warna karamel lebih tinggi dari metode konvensional lainnya dan dukungan venturi untuk efisiensi distribusi gas ozon serta sensor warna untuk optimasi dosing ozon dalam reuse air limbah industri kecap.

KESIMPULAN

Dari hasil awal reuse air limbah industri kecap dengan teknologi Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) dan filtrasi, maka dapat disimpulkan air olahan IPAL industri kecap memiliki kadar warna yang tinggi, sehingga diperlukan pengolahan reuse sebelum air tersebut digunakan kembali.

Teknologi reuse yang tepat untuk mengolah air limbah industri kecap adalah dengan teknologi mobile ozonasi katalitik (e-sikat) dan filtrasi karena menghasilkan penghilangan warna secara efektif dan efisien, tanpa penambahan bahan kimia, dan tidak menghasilkan lumpur endapan. Kondisi operasi mobile ozonasi katalitik terbaik untuk air limbah industri kecap, waktu ozonasi katalitik 11 menit dengan dosis ozon 10 g/h.

SARAN

Reuse air limbah industri kecap dengan teknologi Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat)

dan

filtrasi secara realtime dan online perlu dilakukan untuk peningkatan efisiensi proses penghilangan warna dan cemaran lain yang tersisa melalui penambahan sensor SAC, sensor indeks biodegradasi, dan sensor lain terkait cemaran air. Diperlukan analisis data yang dilengkapi dengan perhitungan-perhitungan operasional yang berkaitan dengan bagaimana Mobile Ozonasi Katalitik (E-Sikat) dan filtrasi secara realtime dan online sebagai teknologi pengolahan air limbah industri kecap, kemudian perhitungan berapa konsumsi energi ketika proses pengolahan air limbah dilaksanakan dan memerlukan waktu berapa lama untuk memenuhi baku mutu kualitas air reuse.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Hadi Pranoto dari CV Bartec Utama Mandiri atas dukungan teknis terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aghaeinejad-Meybodi, A., Ebadi, A., Shafiei, S., Khataee, A., Kiadehi, A.D., "Degradation of Fluoxetine using catalytic ozonation in aqueous media in the presence of nano- Γ -alumina catalyst: Experimental, modeling and optimization study". Sep. Purif. Technol. 211, 2019, 551–563.
- Barbera, M., Gurnari, G., Wastewater treatment and reuse in the food industry. 2018.
- Bui, X.-T., Chiemchaisri, C., Fujioka, T., Varjani, S., Water and Wastewater Treatment Technologies. 2018.
- Fang, R., Huang, W., Huang, H., Feng, Q., He, M., Ji, J., Liu, B., Leung, D.Y.C., "Efficient MnO_x/SiO₂@AC catalyst for ozone-catalytic oxidation of gaseous benzene at ambient temperature". Appl. Surf. Sci. 470, 2019, 439–447.
- Fei, C., Li, D., Mao, X., Guo, Y., Jing, W., "Synthesis of ordered mesoporous

- man ganese titanium composite oxide catalyst for catalytic ozonation". *Chinese J. Chem. Eng.* 26, 2018.
- Ghughe, S.P., Saroha, A.K., "Catalytic ozonation for the treatment of synthetic and industrial effluents - Application of mesoporous materials: A review". *J. Environ. Manage.* 211, 2018, 83–102.
- Gottschalk, C., Libra, J.A., Saupe, A., *Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications.* 2010.
- Han, C., Zhang, S., Guo, L., Zeng, Y., Li, X., Shi, Z., Zhang, Y., Zhang, B., Zhong, Q., "Enhanced catalytic ozonation of NO over black-TiO₂ catalyst under inadequate ozone (O₃/NO molar ratio = 0.6)". *Chem. Eng. Res. Des.* 136, 2018.
- Kemen LHK, *Best Practice dan Inovasi Industri Proper Tahun 2017.* 2018.
- Kemen LHK, *Atlas status mutu air indonesia tahun 2015.* 2015.
- Kemenperin, *Menperin: Indonesia Surga Kuliner, Produksi Kecap dan Bumbu Rp 14, 3 Triliun.* 2015.
- Kolosov, P., Yargeau, V., "Impact of catalyst load, chemical oxygen demand and nitrite on disinfection and removal of contaminants during catalytic ozonation of wastewater". *Sci. Total Environ.* 651, 2019, 2139–2147.
- Kusminah, I.L., "Penyuluhan 4R (Reduce , Reuse , Recycle , Replace) dan Kegunaan Bank Sampah Sebagai Langkah Menciptakan Lingkungan yang Bersih dan Ekonomis di Desa Mojowuku Kabupaten Gresik". *J. Pengabd. Masy. LPPM Untag Surabaya* 03, 2018, 22–28.
- Li, X., Chen, W., Ma, L., Huang, Y., Wang, H., "Characteristics and mechanisms of catalytic ozonation with Fe-shaving-based catalyst in industrial wastewater advanced treatment". *J. Clean. Prod.* 222, 2019, 174–181.
- Poznyak, T.I., Chairez Oria, I., Poznyak, A.S., "Catalytic ozonation, in: *Ozonation and Biodegradation in Environmental Engineering*", 2019, pp. 115–168.
- Ren, Y., Zhang, H., An, H., Zhao, Y., Feng, J., Xue, L., Luan, T., Fan, Z., "Catalytic ozonation of di-n-butyl phthalate degradation using manganese ferrite/reduced graphene oxide nanofiber as catalyst in the water". *J. Colloid Interface Sci.* 526, 2018.
- Sable, S., Ghute, P., Álvarez, P., Beltrán, F., Medina, F., Contreras, S., "FeOOH and derived phases: efficient heterogeneous catalysts for clofibric acid degradation by advanced oxidation processes (AOPs)". *Catal. Today* 240, 2015, 46–54.
- Said, N.I., "Daur Ulang Air Limbah (Water Recycle) Ditinjau dari Aspek Teknologi, Lingkungan dan Ekonomi", *JAI* 2, 2006, 100–131.
- Tan, X., Wan, Y., Huang, Y., He, C., Zhang, Z., He, Z., Hu, L., Zeng, J., Shu, D., "Three-dimensional MnO₂ porous hollow microspheres for enhanced activity as ozonation catalyst in degradation of bisphenol A. *J. Hazard. Mater.* 321, 2017, 162–172.
- Wang, J., Bai, Z., "Fe-based catalysts for heterogeneous catalytic ozonation of emerging contaminants in water and wastewater". *Chem. Eng. J.* 312, 2017.
- Xu, B., Qi, F., Sun, D., Chen, Z., Robert, D., "Cerium doped red mud catalytic ozonation for bezafibrate degradation in wastewater: efficiency, intermediates, and toxicity". *Chemosphere* 146, 2016, 22–31.
- Yang, L., Hu, C., Nie, Y., Qu, J., "Surface acidity and reactivity of β -FeOOH/Al₂O₃ for pharmaceuticals degradation with ozone: in situ ATR-FTIR studies". *Appl. Catal. B Environ.* 97, 2010, 340–346.
- Zhao, L., Ma, W., Lu, S., Ma, J., "Influencing investigation of metal ions on

heterogeneous catalytic ozonation by ceramic honeycomb for the degradation of

nitrobenzene in aqueous solution with neutral pH". Sep. Purif. Technol. 210, 2019, 167–174