

KAJIAN PENERAPAN *METODE ADVANCED OXIDATION PROCESS* (AOPS) PADA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DI INDONESIA

STUDY OF THE APPLICATION OF THE ADVANCED OXIDATION PROCESS (AOPS) METHOD IN WASTEWATER TREATMENT IN INDONESIA

Malia Laila Nabila¹⁾, Adhi Yuniarto^{1*)}

¹⁾Environmental Engineering Department, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Sukolilo, Surabaya, 60111

^{*)}E-mail: adhy@its.ac.id

Abstrak

Meningkatnya jumlah penduduk dan industri di Indonesia berkorelasi positif dengan jumlah dan jenis limbah yang dihasilkan sehingga pengolahannya akan semakin menantang. Untuk mengatasi hal tersebut, Metode *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) mulai banyak dikembangkan karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode lain. Di Indonesia, literatur yang mengkaji penerapan metode AOPs masih sedikit. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian mengenai penerapan metode AOPs di Indonesia sehingga dapat memberikan kontribusi keilmuan terkait penerapan metode AOPs. Berdasarkan hasil kajian diketahui bahwa, sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia, antara lain sonochemical, fenton, peroxymonosulfate/Katalis, UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/TiO₂, O₃/H₂O₂, O₃/GAC, UV/Fenton/Katalis, fotofenton dan elektronfenton. Sistem tersebut memiliki prinsip kerja yang serupa yaitu memproduksi radikal bebas untuk mendegradasi kontaminan. Akan tetapi terdapat perbedaan yang jelas di antaranya metode tersebut dalam memproduksi radikal bebas tersebut. Selain itu, efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs juga berbeda-beda tergantung jenis sistem AOPs yang dipakai serta faktor-faktor lain seperti kondisi pH, waktu reaksi, konsentrasi H₂O₂, konsentrasi reagen Fe, konsentrasi PMS, variasi debit udara, *feeding rate* ozon, dosis GAC, perbandingan molar H₂O₂:FeSO₄, dosis katalis, tegangan listrik, jarak elektroda, rasio H₂O₂/COD dan lain-lain. Sistem AOPs yang diterapkan di RSUD Banyumas yaitu sistem O₃/UV ditambah media sarang tawon dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 41,67%; COD 33,3%; TSS 26,67%; Minyak dan lemak 37,5% serta Total Coliform 79,17%. Sementara itu, sistem AOPs yang diterapkan di TPA Benowo adalah sistem O₃/UV/H₂O₂ ditambah nanofilter dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 94,63%; COD 94,68%; TSS 95,24%; N-Total 96,71% dan Merkuri 46,15%.

Kata kunci: *Advanced Oxidation*, Indonesia, limbah cair, pengolahan limbah, dan system AOPs.

Abstract

The increasing number of population and industry in Indonesia has a positive correlation to the waste produced and the diversity of its types so that in processing it also has many obstacles. In overcoming this, the Advanced Oxidation Processes (AOPs) method began to be widely developed because it has several advantages compared to other methods. In Indonesia, there is still little literature that examines the application of the AOPs method. Therefore, a study was conducted on the application of the AOPs method in Indonesia so that it could contribute to the literature on the application of the AOPs method. Based on the results of the study, it was found that AOPs systems applied in Indonesia include sonochemical, fenton, peroxymonosulfate/catalyst, UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/TiO₂, O₃/H₂O₂, O₃/GAC, UV/Fenton/Catalyst, photofenton and electronfenton. These systems have the same working principle of producing free radicals to degrade contaminants, but the difference is how the free radicals are produced. Then, the efficiency of reducing AOPs system contaminants also varies depending on the type of AOPs system used and other factors such as

pH conditions, reaction time, H₂O₂ concentration, Fe reagent concentration, PMS concentration, air discharge variation, ozone feeding rate, GAC dose, H₂O₂:FeSO₄ molar ratio, catalyst dose, electrical voltage, electrode distance, H₂O₂/COD ratio and others. The AOPs system applied at Banyumas Regional Hospital is the O₃/UV system plus wasp nest media with a removal efficiency of 41.67% BOD; 33.3% COD; 26.67% TSS; Oil and fat 37.5% and Total Coliform 79.17% while the AOPs system applied in Benowo landfill is O₃/UV/H₂O₂ system plus nanofilter with removal efficiency of BOD 94.63%; COD 94.68%; TSS 95.24%; N-Total 96.71% and Mercury 46.15%.

Keywords: *Advanced, Indonesia, wastewater, oxidation process, waste treatment, and system*

1. PENDAHULUAN

Jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2020 sebanyak 270,2 juta jiwa dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,25 persen, meningkat dibandingkan pada tahun 2019 yaitu sebanyak 268,1 juta dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1,15 persen (BPS Indonesia, 2021). Selain itu, laju pertumbuhan PDB pada tahun 2021 Triwulan I meningkat sebesar 0,61% untuk industri migas dan 6,19% untuk industri non migas (BPS Indonesia, 2021). Produk Domestik Bruto (PDB) merupakan pendapatan nasional atas barang dan jasa yang dihasilkan suatu negara pada periode tertentu (Sapthu, 2013). Perkembangan penduduk dan ekonomi diikuti dengan meningkatnya kuantitas air limbah yang dihasilkan (Yudistira, 2022). Air limbah yang dihasilkan ini harus menjalani proses pengolahan terlebih dahulu sebelum dilepas ke pembuangan akhir agar tidak mengakibatkan pencemaran dan kerusakan lingkungan (Khaliq, 2019).

Selain meningkatnya kuantitas air limbah yang dihasilkan, jenis air limbah juga semakin beragam sehingga memiliki tingkat toksisitas yang berbeda-beda tergantung pada karakteristik limbah tersebut (Enrico, 2019). Banyaknya variasi limbah ini mengakibatkan terjadinya permasalahan pengolahan limbah di Indonesia, diantaranya produksi lumpur yang semakin banyak, luas lahan untuk pengolahan yang terbatas serta kualitas dan kuantitas limbah yang fluktuatif serta semakin toksik sehingga limbah cukup sulit untuk diolah dengan pengolahan konvensional (Ervina, 2018). Untuk mengatasi hal tersebut teknologi yang mulai banyak dikembangkan di Indonesia yaitu *Advanced Oxidation Processes (AOPs)*. Metode ini memiliki beberapa keuntungan seperti tidak membutuhkan lahan yang luas, mampu menguraikan segala jenis senyawa

organik, mampu mengubah limbah beracun menjadi limbah tidak beracun, mampu menguraikan zat warna, tidak menghasilkan lumpur yang harus diolah lagi seperti teknologi koagulasi/sedimentasi, dan tidak perlu adanya regenerasi untuk menjaga efisiensi proses seperti pada pemakaian absorben atau membran penyaring (Augustia, V. A. S. et al., 2018) (Linden & Mohseni, 2014). Akan tetapi, literatur yang mengkaji penerapan metode tersebut masih sangat terbatas.

Studi literatur ini dilakukan dengan tujuan untuk mengkaji mengenai cara kerja efektivitas beberapa pengaplikasian metode AOPs dalam pengolahan beragam jenis limbah di Indonesia. Hasil studi literatur ini diharapkan dapat memberikan referensi dan sumber literatur mengenai penggunaan metode AOPs dalam pengolahan limbah cair di Indonesia.

2. METODE PENULISAN

Metode penulisan terdiri dari dua tahap yaitu peninjauan pustaka dan pembahasan studi kasus. Peninjauan pustaka terdiri dari peninjauan pustaka pra-studi referensi dan pokok studi literatur dengan mengumpulkan literatur yang berasal dari berbagai jenis tulisan ilmiah mengenai pengolahan limbah cair, sistem AOPs serta penerapan sistem AOPs di Indonesia. Selanjutnya, dilakukan pembahasan studi kasus yang diawali dengan meminta data primer dan sekunder dari kasus yang diambil yaitu RSUD Banyumas dan TPA Benowo yang dilanjutkan dengan menganalisa kedua studi kasus sehingga diperoleh kesimpulan.

3. SISTEM AOPs YANG DITERAPKAN DI INDONESIA

3.1. Sonochemical

Sonochemical merupakan salah satu jenis metode AOPs yang memanfaatkan radiasi

ultrasonik dalam menghasilkan radikal bebas berupa senyawa radikal OH^* sehingga zat-zat pencemar akan teroksidasi. Ultrasonik merupakan gelombang suara dengan frekuensi diatas batas yang terdeteksi manusia, umunya berkisar antara 20-10.000 kHz. Ketika gelombang ultrasonik dengan intensitas yang tinggi berinteraksi dengan gas terlarut dalam media cair, hal tersebut akan mendorong terjadinya kavitasi akustik. Kavitasi akustik merupakan suatu proses pembentukan, pertumbuhan dan penghancuran rongga yang melepaskan energi lokal dengan membangkitkan *hot pot* dan radikal bebas yang sangat reaktif (Laila et al., 2017). Mekanisme proses pada sistem *sonochemical* terdapat pada persamaan (1) (Torres-Palma & Serna-Galvis, 2018). Di Indonesia, sistem ini pernah diterapkan untuk mengolah limbah cair rumah sakit umum Zainal Abidin Banda Aceh pada skala lab (Laila et al., 2017).



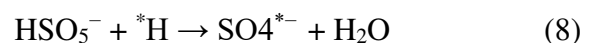
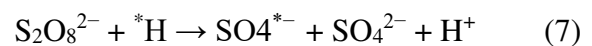
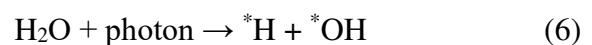
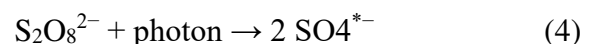
3.2. Fenton

Fenton merupakan salah satu jenis AOPs yang menggabungkan antara H_2O_2 dengan reagen Fe^{2+} . Reagen Fe^{2+} pada sistem ini digunakan sebagai penghancur kontaminan organik pada limbah cair karena reagen ini dapat mendegradasi kontaminan organik terutama dalam fase cairan (Patil & Raut, 2014). Mekanisme prose pada sistem fenton dapat dilihat pada persamaan (2) hingga (3) (Darmadi, 2014). Di Indonesia sistem fenton pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair industri pupuk urea pada PT. Pupuk Iskandar Muda (PIM) Lhokseumawe (Darmadi, 2014), pengolahan limbah cair pada IPAL Industri Penyamakan Kulit Sitimulyo, Yogyakarta (Regmi & Kitada, 2003), pengolahan limbah cair industri kelapa sawit pada IPAL PT. Syaukath Sejahtera di Kabupaten Bireuen (Enrico, 2019), mengolah limbah cair domestik pada waduk reservoir Gampong Pusong, Lhokseumawe (Elfiana, Rahmahwati et al., 2013), pengolahan limbah cair rumah sakit (Setiawa et al., 2013) dan pengolahan limbah cair laboratorium (Cahyana & Permadi, 2018).



3.3. Peroxymonosulfate/katalis

Peroxymonosulfate/katalis merupakan sistem AOPs yang berbeda dengan sistem yang lain. Pada sistem ini, radikal bebas yang dihasilkan bukan radikal hidroksil namun berupa radikal sulfat. Radikal sulfat dihasilkan dari aktivasi *peroxymonosulfate* (PMS) yang dikombinasikan dengan katalis berbasis logam. Akan tetapi, dalam penggunaannya katalis ini menimbulkan pencemaran air karena terjadi *leaching*. Katalis non logam menjadi pilihan yang cukup menjanjikan karena memiliki kelebihan yaitu tidak menghasilkan polusi, membutuhkan biaya yang lebih rendah dan memiliki stabilitas termal / kimia yang baik (Apriliani & Zultiniar, 2019). Mekanisme yang terdasi pada sistem ini dapat dilihat pada persamaan (4) sampai (8) (Priyadarshini et al., 2022). Di Indonesia sistem ini pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair kelapa sawit pada IPAL PT. Perkebunan Nusantara V PKS Sei Galuh (Cahyana & Permadi, 2018) (Priyadarshini et al., 2022) dan mengolah limbah cair pulp dan kertas pada Provinsi Riau (Apriliani & Zultiniar, 2019).



3.4. UV/ H_2O_2

Sistem UV/ H_2O_2 merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara radiasi UV dengan oksidan yang berupa hidrogen peroksida. Hidrogen peroksida merupakan bahan pengoksida sangat kuat yang mampu mendegradasi beberapa campuran yang bersifat garam maupun non-garam di dalam media yang berfase cair. Selain itu, sinar UV juga mampu mendegradasi kontaminan dengan memicu pemecahan ikatan. Kombinasi keduanya, dapat

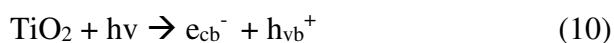
menciptakan suatu proses yang efisien dan cepat dalam mendegradasi pencemar (Setyaningtyas & Dwiasi, 2012).

Mekanisme yang terjadi pada sistem ini merupakan reaksi oksidasi kimiawi yaitu terjadinya pemecahan molekul hidrogen peroksida menjadi 2 molekul radikal hidroksil ketika hidrogen peroksida terpapar sinar UV. Hal ini akan meningkatkan proses fotodegradasi. Persamaan mekanisme yang terjadi dapat dilihat pada persamaan (9) (Merzwa et al., 2018). Di Indonesia sistem UV/H₂O₂ pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair industri mie kuning di daerah Karangpucung, Cilacap (Setyaningtyas & Dwiasi, 2012), pengolahan limbah cair pabrik eleokimia (Chuango et al., 2013) dan pengolahan limbah cair industri tahu di daerah Banda Aceh (Pontas & Muslim, 2015).



3.5. UV/H₂O₂/TiO₂

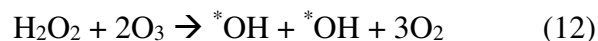
Sistem UV/H₂O₂/TiO₂ merupakan gabungan antara iradiasi, oksidan dan fotokatalis. Sistem ini dipertimbangkan untuk meningkatkan radikal $\cdot\text{OH}$ dan meningkatkan hasil akhir rasio BOD/COD. Pada proses ini, elektron pada pita konduksi dan lubang pada pita valensi yang terdapat pada titanium dioksida akan menyerap sinar UV dan adanya H₂O₂ akan meningkatkan jumlah akseptor elektron sehingga semakin meningkatkan jumlah radikal bebas yang dihasilkan. Mekanisme proses yang terjadi pada sistem UV/H₂O₂/TiO₂ dapat dilihat pada persamaan (10) dan (11) (Yuningrat, 2015). Di Indonesia sistem ini pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah lindi di TPA Bengkala Singaraja (Yuningrat, 2015), dan pengolahan limbah cair industri batu bara di PT. Bukit Asam yang berlokasi di Tanjung Enim (Marhaini & Wibowo, 2016).



3.6. O₃/H₂O₂

Sistem O₃/H₂O₂ merupakan salah satu sistem

dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara ozon dengan oksidan yang berupa hidrogen peroksida. Sistem ini merupakan sistem yang umum digunakan karena praktis, relatif aman dan biaya yang cukup murah (Ristiawan et al., 2015). Penggunaan sistem ini lebih efektif dibandingkan dengan penggunaan ozon atau hidrogen peroksida secara terpisah. Pada sistem ini, H₂O₂ berperan sebagai inisiator dalam mendekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil dan superoksida yang kemudian bereaksi secara beruntun dengan ozon. Dengan adanya penambahan H₂O₂ membuat proses dekomposisi ozon berjalan dengan lebih cepat sehingga sangat efektif untuk mendegradasi kontaminan (Gelardiansyah et al., 2015). Persamaan pada sistem ini dapat dilihat pada persamaan (12) (Ikehata & Li, 2018). Di Indonesia sistem ini pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah lindi pada TPA Sarimukti, Bandung Barat (Fadiyah et al., 2017) dan pengolahan limbah industri pulp dan kertas pada salah satu pabrik pulp dan kertas di Bekasi (Enjarlis, & Hardi, 2010).



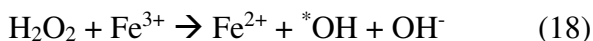
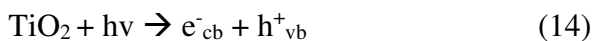
3.7. O₃/GAC

Sistem O₃/GAC merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara ozon dengan GAC atau *Granular Activated Carbon*. Teknologi AOPs dengan sistem tersebut lebih cocok dikembangkan di Indonesia karena karbon aktif mudah didapat. Selain itu, proses ini juga tidak memerlukan regenerasi karena kontaminan dalam pori karbon aktif dapat diurai oleh ozon dan jumlah ozon (Enjarlis, & Hardi, 2010). Sistem ini termasuk dalam ozonasi katalik heterogen dimana GAC berfungsi sebagai katalis padat yang mempercepat terbentuknya senyawa radikal karena GAC tak hanya bertindak sebagai adsorben, tetapi juga sebagai katalis reaksi oksidasi ozon sehingga dapat mendegradasi kontaminan lebih cepat dan efisien. Selain itu, GAC di sistem ini juga berfungsi untuk membantu proses absorpsi mikropolutan hasil oksidasi dari sistem AOPs (Ayuningtyas, 2020). Di Indonesia sistem ini pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair industri tapioka Enjarlis, & Hardi, 2010) dan mengolahpengolahan

limbah cair industri batik yang berasal dari Giriloyo, Yogyakarta (Ayuningtyas, 2020).

3.8. UV/Fenton/Katalis

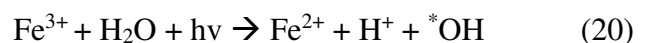
Sistem UV/Fenton/ Katalis merupakan salah satu sistem dari *advanced oxidation process* yang mengkombinasikan antara radiasi sinar UV, fenton dan katalis. Kombinasi kedua sistem itu dapat meningkatkan produksi radikal hidroksil sehingga meningkatkan degradasi kontaminan. Mekanisme yang terjadi pada sistem ini yaitu ketika sinar UV mengenai titanium dioksida akan membentuk radikal hidroksil, sehingga jumlah katalis titanium dioksida sangat menentukan jumlah produksi radikal hidroksil. Persamaan reaksi yang terjadi dalam proses UV/Fenton/Katalis dapat dilihat pada persamaan (13) hingga (17) (Fauzi, 2018). Di Indonesia sistem ini pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair industri batik pada perusahaan batik Roro Djonggrang Yogyakarta (Dewi & Wardiyati, 2015) dan industri Batik Tulis Namiroh Jetis, Sidoarjo (Fauzi, 2018).



3.9. Fotofenton

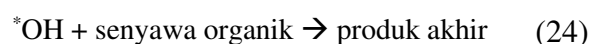
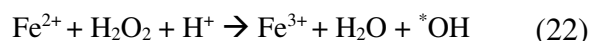
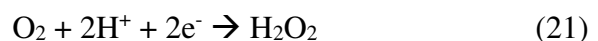
Fotofenton merupakan salah satu jenis AOPs yang mengkombinasikan sistem fenton dengan radiasi sinar UV. Sinar UV akan membantu meningkatkan proses fenton dan dekomposisi organik dikarenakan pada proses fotofenton terdapat $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ yang dapat menyerap cahaya dan memberikan tambahan radikal hidroksil dan mengurangi hasil endapan fenton (William Steviano Lesa et al., 2020). Mekanisme pada sistem ini yaitu ion Fe^{2+} direaksikan dengan hidrogen peroksida sehingga menghasilkan ion Fe^{3+} dan radikal hidroksil. Kemudian, ion Fe^{3+} yang terbentuk akan bereaksi dengan sinar UV dan dihasilkan Fe^{2+} dan radikal hidroksil.

Persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan (19) dan (20) (Wardiyati et al., 2012). Di Indonesia sistem fotofenton pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair industri batik pada perusahaan batik Roro Djonggrang Yogyakarta (Wardiyati et al., 2012) dan pengolahan limbah lindi pada Rumah Kompos Wonorejo, Surabaya (William Steviano Lesa et al., 2020)..



3.10 Elektronfenton.

Elektrofenton adalah salah satu jenis AOPs yang mengkombinasikan antara proses elektrokoagulasi dengan reaksi fenton. Secara umum, terdapat dua aplikasi elektrofenton. Yaitu reagen fenton ditambahkan ke dalam reaktor dari luar menggunakan elektroda inert yang memiliki sifat katalitik yang tinggi dan hidrogen peroksida ditambahkan dari luar serta Fe^{2+} disediakan dengan mengorbankan anoda (Wardiyati et al., 2012). Mekanisme proses elektrofenton dapat dilihat pada persamaan (21) sampai (24) (Paramo-Vargas et al., 2015). Di Indonesia sistem elektrofenton pernah diterapkan dalam skala lab untuk mengolah limbah cair industri tekstil pada PT. Sorin Setosa di daerah Krian, Jawa Timur (Wardiyati et al., 2012) dan pengolahan limbah cair rumah sakit pada IPAL salah satu rumah sakit di Kota Yogyakarta (Putri et al., 2020).



4. KINERJA SISTEM AOPs YANG DITERAPKAN DI INDONESIA

Kinerja sistem AOPs yang diterapkan di Indonesia dalam mendegradasi berbagai pencemar berbeda-beda tergantung pada jenis sistem serta faktor-faktor yang mempengaruhinya. Rangkuman kinerja sistem dalam mendegradasi berbagai pencemar beserta

faktor yang mempengaruhi dapat di lihat pada **Tabel 1**.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi studi kasus yang digunakan adalah RSUD Banyumas dan TPA Benowo. Kedua lokasi tersebut merupakan lokasi yang sudah menerapkan metode AOPs.

5.1. RSUD Banyumas

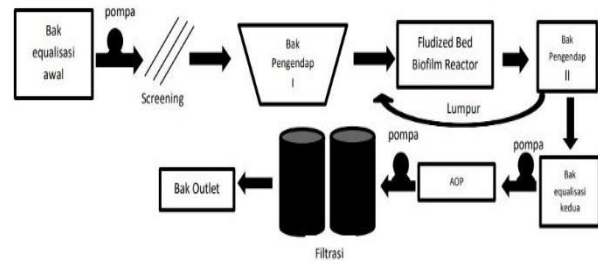
Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Banyumas merupakan rumah sakit pemerintah yang terletak di Jl. Rumah Sakit no 1 Desa Kejawar, Kecamatan Banyumas, Kabupaten Banyumas, Provinsi Jawa Tengah dengan lahan seluas 46.560 m². Secara geografis, RSUD Banyumas terletak pada titik koordinat 70 34'9,71"- 7034'4,57" LS dan 1090 10' 57,01" – 1090 11' 03" BT. Jenis limbah yang dihasilkan RSUD Banyumas berupa limbah domestik yang berasal dari *septic tank*, *floor drain*, ruang gizi, *laundry*, dan lain-lain dengan rata-rata debit air limbah outlet sebesar 232 m³/hari serta karakteristik limbah cair yang dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Karakteristik limbah cair RSUD Banyumas

Parameter	Satuan	Hasil	Baku Mutu*
pH		7,2	6-9
BOD	mg/L	72	30
COD	mg/L	124	100
TSS	mg/L	31	30
Minyak dan Lemak	mg/L	4,9	5
Ammonia (NH ₃ -N)	mg/L	0,13	10
Total Coliform	Jumlah/100 mL	>24.000	3000

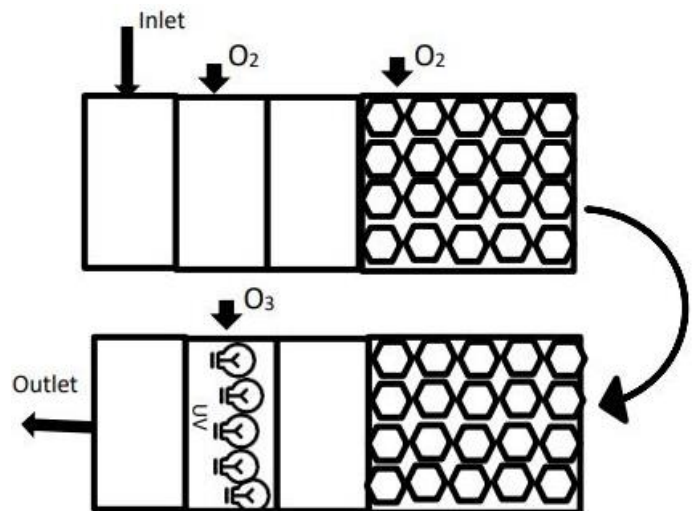
*Baku mutu : Permen LHK No. P.68/Menlhk/Setjen/Kum.1/8/2016 Tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik

IPAL RSUD Banyumas masih menggunakan metode konvensional dalam pengolahannya namun ditambah sistem AOPs pada akhir pengolahan yang berperan sebagai desinfeksi. Diagram alir IPAL RSUD Banyumas dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram Alir RSUD Banyumas

Sistem AOPs yang digunakan pada IPAL RSUD Banyumas yaitu sistem O₃/UV dengan media sarang tawon dengan lampu UV C dengan daya 45 watt. Jumlah lampu UV yang digunakan sebanyak 5 buah sehingga kekuatan sinar UV yang direaksikan sebesar 225 watt. Ozon yang dihasilkan berasal dari udara disekitar yang diubah menjadi ozon menggunakan ozon generator. Akan tetapi, untuk saat ini, ozon generator tidak berfungsi sehingga hanya direaksikan dengan sinar UV saja. Sketsa sistem AOP IPAL RSUD Banyumas dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Sketsa Sistem AOPs RSUD Banyu

Tabel 1 Kinerja Sistem Dalam Mendegradasi Berbagai Pencemar Beserta Faktor Yang Mempengaruhi

Jenis Pencemar	Sistem AOPs									
	Sonochemical	Fenton	Peroxymonosulfate/ Katalis	UV/ H ₂ O ₂	UV/ H ₂ O ₂ / TiO ₂	O ₃ / H ₂ O ₂	O ₃ / GAC	UV/ Fenton/ Katalis	Fotofenton	Elektrofenton
COD	81,88% [10]	34–83,10% [14,15,16,17,18]	20,68 – 88,22% [19,21,22]	70,39 – 76,78% [25,26]	35 – 50% [27]	4,6 – 28,1% [29]	13,46 – 98,53% [33]	68,5 – 92% [35,42]	35 – 87% [37]	47,78 – 94,1% [39,40]
BOD					35 – 39% [27]		18,18 – 82,42% [33]		38 – 70% [37]	
TSS		88,39% [15]		22,4 – 46,19% [25]				70 – 91% [35]		
Zat Warna				7 – 69% [23]			98,75 – 99,9% [34]	58,7 – 100% [35,36,42]	95,5 – 98,5% [38]	72,3 – 99,5% [39]
Urea		72,8 – 100% [13]								
Lignin						68,5 – 88,4% [29]				
Fe					45 – 49% [28]					
Hg					26 – 60% [28]					
PO ₄									30 – 65% [37]	
Total N									49 – 79% [37]	
CN							13,46 – 98,53% [33]			
Fenol							94,75 – 99,8% [34]			
Kekeruhan						22,49 – 45,15% [32]				
DHL						10 – 15% [32]				
Faktor yang mempengaruhi	pH[10],waktu kontak[10] dan Konsentrasi	pH[17], konsentrasi Fe[16,18],Rasi o	Konsentrasi PMS[21,22]dan katalis[19]	pH[23],waktu kontak[23,26] dan Konsentrasi H ₂ O ₂ [23,25]	pH [28] dan Konsentrasi H ₂ O ₂ [27]	<i>Feeding rate</i> ozon[29], variasi debit udara	Waktu kontak [33.34]dosis GAC [34] dan pH [33]	Katalis [42] dan perbandingan molaritas rasio	Konsentras i H ₂ O ₂ [38] Konsentras i	Tegangan [39], jarak elektroda [39], perbandingan

Tabel 1 Kinerja Sistem Dalam Mendegradasi Berbagai Pencemar Beserta Faktor Yang Mempengaruhi										
Jenis Pencemar	Sistem AOPs									
	Sonochemical	Fenton	Peroxymonosulfate/ Katalis	UV/ H ₂ O ₂	UV/ H ₂ O ₂ / TiO ₂	O ₃ / H ₂ O ₂	O ₃ / GAC	UV/ Fenton/ Katalis	Fotofenton	Elektrofenton
	H ₂ O ₂ [10]	COD/H ₂ O ₂ [17]] dan konsentrasi H ₂ O ₂ [13]				[32]dan Konsentrasi H ₂ O ₂ [29]		H ₂ O ₂ :FeSO ₄ [35]	FeSO ₄ .H ₂ O [38] dan perbanding an molaritas rasio H ₂ O ₂ :FeS O ₄ [37]	molaritas rasio H ₂ O ₂ :FeSO ₄ [40]

Kemudian, dilakukan perhitungan efektifitas pencemar untuk mengetahui kinerja sistem AOP pada RSUD Banyumas. Rumus untuk menghitung efektifitas pencemar yaitu :

$$\%R = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100\%$$

Dimana:

Ci = Konsentrasi Inlet;

Co = Konsentrasi Outlet

Dari rumus tersebut, diperoleh efektifitas pencemar yang dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Data Efektifitas Penurunan Parameter Pencemar oleh AOP pada IPAL RSUD Banyumas

Parameter	Satuan	C _i ¹⁾	C _o ¹⁾	%R ²⁾
BOD	mg/L	12	7	41,67%
COD	mg/L	18	12	33,3%
TSS	mg/L	15	11	26,67%
Minyak dan lemak	mg/L	4	2,5	37,5%
Ammonia (NH ₃ -N)	mg/L	0,01	0,02	-
Total Coliform	Jumlah/100 mL	>24.000	5.000	>79,17%

Kelebihan yang dirasakan oleh RSUD Banyumas dalam menerapkan sistem AOPs yaitu lebih efektif dalam membunuh bakteri *E.coli*. Selain itu, terdapat kekurangan yang dirasakan oleh RSUD Banyumas dalam menerapkan sistem AOPs yaitu perawatan dan pemeliharaan cukup sulit seperti lampu UV yang sering mati dan ozon generator yang rusak serta biaya perawatan dan pemeliharaan yang tinggi

5.2. TPA Benowo

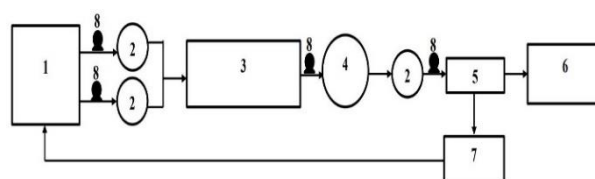
Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Benowo merupakan tempat pembuangan akhir pemerintah milik Kota Surabaya dimana seluruh sampah yang berada di TPA Benowo berasal dari Kota Surabaya. Pengelolaan sampah di TPA Benowo dikelola oleh PT. Sumber Organik sejak Oktober 2012 dan pengelolaannya tetap bekerja sama dengan pemerintah Kota Surabaya. TPA Benowo

terletak di wilayah Kelurahan Romokalisari, Kecamatan Benowo, Kota Surabaya dengan lahan seluas 374.065 m². Titik tengah TPA Benowo terletak pada titik koordinat 70 13'7,89" LS dan 1120 37' 47,13" LS. Jenis limbah yang dihasilkan TPA Benowo berupa lindi dengan rata-rata debit air lindi dalam 5 bulan pertama pada tahun 2022 yaitu 502,4 m³/hari untuk inlet IPL dan 326,4 m³/hari untuk outlet IPL karakteristik limbah cair yang dihasilkan dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Karakteristik Limbah Cair TPA Benowo

Parameter	Satuan	Hasil	Baku Mutu
pH		8,05	6-9
BOD	mg/L	540	150
COD	mg/L	1636	300
TSS	mg/L	63	100
N-Total	mg/L	25,2	60
Merkuri (Hg)	mg/L	0,00078	0,005
Cadmium (Cd)	mg/L	<0,003	0,1

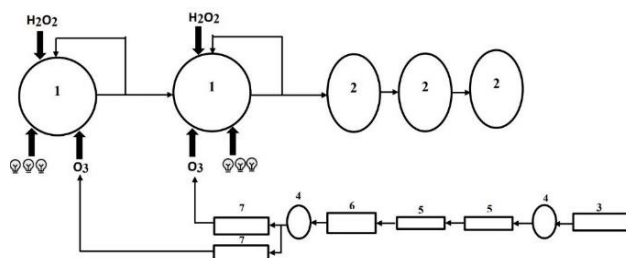
IPL TPA Benowo menerapkan sistem AOP-NF dalam mengolah lindinya dan posisi AOP pada sistem tersebut sebagai pengolahan utama. Diagram alir IPL TPA Benowo dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Diagram Aliran TPA Benowo

Sistem AOPs pada IPL TPA Benowo memiliki kapasitas 600-1200 m³/hari. Sistem IPL yang digunakan yaitu sistem AOP yang mengkombinasikan antara ozon, lampu UV dan hidrogen peroksida. sumber UV yang digunakan berupa lampu UV C berkekuatan 80-watt berjumlah 19 buah pada 1 reaktor, sehingga total kekuatan yang direaksikan ke air limbah sebesar 1520-watt untuk 1 reaktor. Dikarenakan jumlah reaktor pada IPL TPA Benowo sebesar 2 buah, maka keseluruhan kekuatan sinar UV yang direaksikan dalam mengolah limbah sebesar 3040 watt. Lalu, untuk besar feeding rate ozonnya sebesar 125-200 LPM dan untuk penambahan

hidrogen peroksida sekitar 630-1050 kg/hari hidrogen peroksida tidak boleh kurang dan tidak boleh berlebih dengan hidrogen peroksida 32%. Sketsa sistem AOP IPL TPA Benowo dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Sketsa Sistem AOPs TPA Benowo

Keterangan:

- | | |
|----------------------|---------------------|
| 1. Oxidation Reactor | 2. Holding Tank |
| 3. Air Compressor | 4. Tank |
| 5. Air Dryer | 6. Oxygen Generator |
| 7. Ozon Generator | |

Kemudian, dilakukan perhitungan efektifitas pencemar untuk mengetahui kinerja sistem AOP-NF pada TPA Benowo. Dari perhitungan, diperoleh efektifitas pencemar yang dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Data Efektifitas Penurunan Parameter Pencemar oleh AOP-NF pada IPL TPA Benowo

Parameter	Satuan	$C_i^{(1)}$	$C_o^{(1)}$	%R ⁽²⁾
BOD	mg/L	540	29	94,63 %
COD	mg/L	1636	87	94,68 %
TSS	mg/L	63	3	95,24 %
N-Total	mg/L	25,2	0,83	96,71 %
Merkuri (Hg)	mg/L	0,00078	0,00042	46,15 %
Cadmium (Cd)	mg/L	<0,003	<0,003	-

Kelebihan yang dirasakan oleh TPA Benowo dalam menerapkan sistem AOP yaitu tidak membutuhkan lahan yang luas, sebelum menerapkan AOP luas lahan yang dibutuhkan

untuk pengolahan lindi sekitar 3 Ha sedangkan setelah menerapkan AOP luas lahan yang dibutuhkan hanya setengah dari yang sebelumnya, tidak menghasilkan lumpur yang bersifat B3 dan operasi serta pemeliharaannya mudah sehingga tidak membutuhkan operator dengan jumlah yang banyak. Selain itu, terdapat kekurangan yang dirasakan oleh TPA Benowo dalam menerapkan sistem AOP yaitu Biaya operasi atau produksinya tinggi bahkan termasuk tertinggi kedua dari keseluruhan biaya yang dikeluarkan oleh TPA Benowo.

Dari penjelasan mengenai penerapan sistem AOPs dari studi kasus tersebut, maka dapat dirangkum dan dibandingkan kedua studi kasus tersebut dalam berbagai aspek yang dapat dilihat pada **Tabel 6**. Berdasarkan **Tabel 6** dapat diketahui bahwa:

1) Keefektifan penurunan pencemar TPA Benowo lebih tinggi dibandingkan dengan RSUD Banyumas. Hal itu dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti: (a) Posisi AOP dalam instalasi pengolahannya, pada RSUD Banyumas, AOP berfungsi sebagai post-treatment sehingga pengolahan tersebut hanya membantu mendegradasi polutan yang tidak dapat diurai pada pengolahan sebelumnya sedangkan pada TPA Benowo AOP berfungsi sebagai pengolahan utama sehingga konsentrasi limbah yang diolah AOP pun berbeda dengan RSUD Banyumas. (b) Sistem AOP yang digunakan, pada RSUD Banyumas, sistem AOP yang digunakan yaitu UV/O₃ dengan media sarang tawon sedangkan pada TPA Benowo, sistem AOP yang digunakan yaitu UV/O₃/H₂O₂ dengan nanofilter. (c) Kondisi proses, pada RSUD Banyumas, kekuatan UV yang digunakan lebih kecil dibandingkan TPA Benowo, lalu untuk ozon tidak berfungsi dengan baik sedangkan pada TPA Benowo kekuatan UV lebih besar dibandingkan RSUD Banyumas, ozon berfungsi dengan baik dan terjadi penambahan H₂O₂.

Tabel 6. Perbandingan Kedua Studi Kasus dari Berbagai Aspek

Aspek	Studi Kasus	
	RSUD Banyumas	TPA Benowo
Jenis Limbah	Limbah rumah sakit non-B3	Lindi
Karakteristik limbah	pH = 7,2 BOD = 72 mg/L COD= 124 mg/L TSS= 31 mg/L Minyak dan Lemak = 4,9 mg/L Ammonia (NH₃-N) = 0,13 mg/L Total Coliform = >24.000 Jumlah/100 mL	pH = 8,05 BOD =540 mg/L COD =1636 mg/L TSS = 63 mg/L N-Total = 25,2 mg/L Merkuri (Hg) = 0,00078 mg/L Cadmium (Cd) = <0,003 mg/L
Diagram alir	Bak equalisasi awal → <i>Screening</i> → Bak pengendap I → <i>Fludized Bed Film Reactor</i> → Bak pengendap II → Bak equalisasi kedua → AOP → Filtrasi → Outlet	<i>Leachate Pond</i> → <i>Bag Filter</i> → AOP → <i>Multimedia Filter</i> → <i>Nano filter</i> → <i>Final Holding Tank</i>
Sistem AOP	UV/O ₃ + media sarang tawon	UV/O ₃ /H ₂ O ₂ + Nanofilter
Posisi AOP	Pengolahan lanjut (<i>post-treatment/ tertiary treatment</i>)	Pengolahan utama
Kondisi proses	UV = 225 watt O₃ = rusak/tidak bisa digunakan	UV = 3040 watt O₃ = 125-200 LPM H₂O₂ (32%) = 630-1050 kg/hari
Efisiensi penurunan pencemar	BOD = 41,67% COD = 33,3% TSS = 26,67% Minyak dan lemak = 37,5% Total coliform = 79,17%	BOD = 94,63% COD = 94,68% TSS = 95,24% N-Total = 96,71% Merkuri =46,15%.
Air olahan	Dibuang ke badan air	Digunakan kembali untuk mencuci roda truk dan mencuci alat berat - Tidak membutuhkan lahan yang luas. - Tidak menghasilkan lumpur yang bersifat B3. - Operasi dan pemeliharaannya mudah sehingga tidak membutuhkan operator dengan jumlah yang banyak.
Kelebihan	Lebih efektif dalam membunuh bakteri <i>ecoli</i>	
Kekurangan	- Perawatan dan pemeliharaan cukup sulit seperti lampu uv yang sering mati dan ozon generator yang rusak - Biaya perawatan dan pemeliharaan yang tinggi	Biaya operasi atau produksinya tinggi

2) Sistem AOP sangat efektif jika digunakan untuk mengolah limbah yang mengandung polutan sulit terurai dan/atau berbahaya yang tidak dapat diolah dengan pengolahan limbah konvensional karena dengan biaya yang tinggi sebanding dengan kemampuan dalam mendegradasi pencemarnya yang mengalami perbedaan yang cukup signifikan dibandingkan dengan diolah menggunakan pengolahan limbah konvensional sehingga layak untuk dipertimbangkan. Namun, kurang efektif jika digunakan untuk mengolah limbah dengan kandungan polutan yang masih dapat diolah dengan pengolahan limbah konvensional karena membutuhkan biaya yang lebih tinggi dibandingkan pengolahan limbah konvensional sedangkan kemampuan pendegradasiannya tidak terjadi perbedaan yang signifikan.

KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari kajian ini yaitu:

- a. Sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang diterapkan di Indonesia, antara lain: sonochemical, fenton, peroxymonosulfate/katalis, UV/H₂O₂, UV/H₂O₂/TiO₂, O₃/H₂O₂, O₃/GAC, UV/fenton/katalis, fotofenton dan elektronfenton. Sistem tersebut dapat digunakan dalam mengolah berbagai limbah industri, limbah domestik, limbah rumah sakit, limbah lindi dan limbah laboratorium. Prinsip kerja pada masing masing sistem pada prinsipnya sama yaitu memproduksi radikal bebas baik berbentuk radikal hidroksil maupun radikal sulfat yang berfungsi untuk mendegradasi kontaminan. Akan tetapi, yang membedakan adalah cara memproduksi radikal bebas tersebut.
- b. Efisiensi penurunan pencemar sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) berbeda-beda tergantung jenis sistem AOPs yang digunakan serta dipengaruhi faktor lain seperti kondisi pH, waktu reaksi, konsentrasi hidrogen peroksida, konsentrasi reagen Fe, konsentrasi PMS, suhu, variasi debit udara, feeding rate ozon, dosis GAC, perbandingan molar H₂O₂: FeSO₄, dosis katalis, tegangan listrik, jarak elektroda dan rasio H₂O₂/COD.
- c. Sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang diterapkan di RSUD Banyumas yaitu menggunakan O₃/UV ditambah media sarang tawon dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 41,67%; COD 33,3%; TSS 26,67%; minyak dan lemak 37,5% dan total coliform 79,17% sedangkan sistem AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang diterapkan di TPA Benowo yaitu menggunakan O₃/UV/H₂O₂ ditambah nanofilter dengan efisiensi penyisihan pencemar BOD 94,63%; COD 94,68%; TSS 95,24%; N-Total 96,71% dan Merkuri 46,15%.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada RSUD Banyumas dan TPA Benowo atas kesediannya membantu penulis dalam proses penyelesaian studi ini serta seluruh pihak yang telah membantu selama proses penyelesaian studi ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik. (2021b). *Statistik Indonesia 2021*. Badan Pusat Statistik.
- [2] Badan Pusat Statistik. (2021a). *Produk Domestik Bruto Indonesia Triwulanan*. Badan Pusat Statistik.
- [3] Sapthu, A. (2013). Pengaruh Penanaman Modal dalam Negeri dan Penanaman Modal Asing terhadap Produk Domestik Bruto di Indonesia. *Cita Ekonomika Jurnal Ekonomi*, 7(1), 193–199.
- [4] Yudistira, D. R. (2022). Analisis Kualitas Air Limbah Kilang Sebelum Dibuang Ke Badan Air. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 12(1), 46–55.
- [5] Khaliq, A. (2015). Analisis Sistem Pengolahan Air Limbah Pada Kelurahan Kelayan Luar Kawasan IPAL Pekapuran Raya PD PAL Kota Banjarmasin. *Jurnal POROS TEKNIK*, 7(1), 1–53.
- [6] Enrico. (2019). Dampak Limbah Cair Industri Tekstil Terhadap Lingkungan dan Aplikasi Tehnik Eco Printing sebagai Usaha Mengurangi Limbah. *Moda*, 1(1), 5–13.
- [7] Ervina. (2018, March 6). Pengolahan

- Limbah Cair Pada Industri Dan Permasalahannya.
- [8] Augustia, V. A. S., Lestari, I. D., & Rani, M. D. (2018). Degradasi Limbah Zat Warna Direk Dengan Metode Advanced Oxidation Processes (AOPs) Kombinasi H₂O₂ / MnO₂ dengan Parameter Uji BOD, COD dan pH. *Eksergi*, 15(1), 5–8.
 - [9] Linden, K. G., & Mohseni, M. (2014). 2.8-Advanced Oxidation Processes: Applications in Drinking Water Treatment. In S. Ahuja (Ed.), *Comprehensive Water Quality and Purification* (Vol. 2, pp. 148–172). Elsevier Ltd.
 - [10] Kusuma, L., Darmadi, & Adisalamun. (2017). Pengolahan Limbah Cair Rumah Sakit secara Sonochemical. *Jurnal Litbang Industri*, 7(1), 29–39. <https://doi.org/10.24960/jli.v7i1.2691.29-39>
 - [11] Torres-Palma, R. A., & Serna-Galvis, E. A. (2018). Sonolysis. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 177–213). Elsevier.
 - [12] Patil, A. D., & Raut, P. D. P. D. (2014). Treatment of textile wastewater by Fenton's process as a Advanced Oxidation Process. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(10), 29–32.
 - [13] Darmadi. (2014). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Pupuk Urea Menggunakan Advanced Oxidation Processes. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 10(1), 1–6.
 - [14] Sholeh, M., Supraptiningsih, S., & Arsitika, W. P. (2013). Penurunan COD Air Limbah Industri Penyamakan Kulit menggunakan Reagen Fenton. *Majalah Kulit, Karet, Dan Plastik*, 29(1), 31–36.
 - [15] Yulia, R., Meilina, H., Adisalamun, & Darmadi. (2016). Aplikasi Metode Advance Oxidation Process (AOP) Fenton pada Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 11(1), 1–9.
 - [16] Elfiana, Rahmahwati, C. A., Zaini, H., & Fuadi, A. (2013). Kajian efektifitas reagen fenton untuk menurunkan konsentrasi cod air limbah domestik secara batch pada metode aop berbasis h₂o₂. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 13(2), 57–59.
 - [17] Setiawan, O., Sarto, & Cahyono, R. B. (2020). Pengaruh pH Umpan dan Rasio COD / H₂O₂ terhadap Penurunan COD pada Limbah Cair Rumah Sakit melalui Metode Fenton. *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" Pengembangan Teknologi Kimia Untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, 1–6.
 - [18] Cahyana, G. H., & Permadi, D. (2018). Pengolahan Air Limbah Laboratorium Menggunakan Metode AOPs (Advanced Oxidation Process) dengan Pereaksi Fenton (H₂O₂ dan FeSO₄) pada Skala Batch. *Envirosan*, 1(1), 1–7.
 - [19] Apriliani, M., Saputra, E., & Zultinir. (2019). Pengolahan Limbah Cair Industri Pulp dan Kertas dengan Metode Advanced Oxidation Process Berbasis Sulphate Radical (Sr-AOP) Menggunakan Katalis Nitrogen-Doped Three-Dimensional Carbon Framework (3D NCF). *JOM FTEKNIK*, 6(1), 1–7.
 - [20] Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., & Blaney, L. (2022). Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. *Journal of Environmental Management*, 316, 1–19.
 - [21] Hasrul, Saputra, E., & Khairat. (2018). Pengolahan Limbah Cair Sawit dengan Metode AOP (Advanced Oxidation Process) Menggunakan Katalis Lamno₃ Perovskite dengan Variasi Oksidan Peroxymonosulfate. *Jom FTEKNIK*, 5(1), 1–4.
 - [22] Riandy, M. A., Saputra, E., & Pinem, J. A. (2018). Pengolahan Limbah Cair Sawit dengan Metode AOP (Advanced Oxidation Process) Menggunakan Katalis LaMnO₃ Perovskite dan Oksidan. *Jom FTEKNIK*, 5(1), 1–5.
 - [23] Setyaningtyas, T., & Dwiasi, D. W. (2012). Degradasi Zat Warna Azo Tartrazin pada Limbah Cair Mie dengan Metode AOPs (Advanced Oxidation Processes). *Molekul*, 7(2), 153–162.
 - [24] Mierzwa, J. C., Rodrigues, R., & Teixeira, A. C. S. C. (2018). UV-Hydrogen Peroxide Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 13–48).
 - [25] Chuango, L., Chairuddin, & Sembiring, T. (2013). Penggunaan Sinar UV dan Hidrogen Peroksida untuk Menurunkan COD, TSS dan TDS Air Buangan Pabrik Oleokimia. *Jurnal Saintia Kimia*, 1(2), 1–7.
 - [26] Pontas, K., & Muslim, A. (2015). Oxidation Process of H₂O₂/UV for COD Reduction of Wastewater from Soybean Tofu Production.

- Makara Journal of Technology*, 19(3), 120–126.
- [27] Yuningrat, N. W., Gunamantha, I. M., & Wiratini, N. M. (2012). Degradasi Pencemar Organik dalam Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 1(2), 73–84.
- [28] Marhaini, & Wibowo, H. S. (2016). Pengembangan Proses Oksidasi Tingkat Lanjut Menggunakan Fotokatalis TiO₂ dengan Penambahan H₂O₂ untuk Pengolahan Limbah Cair Industri Pertambangan Batubara. *Distilasi*, 1(1), 51–56.
- [29] Ristiawan, A., & Syafila, M. (2015). Kinetika Degradasi Lignin dari Limbah Cair Industri Pulp and Paper Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP) Dengan Kombinasi Ozon dan Hidrogen Peroksida. *Jurnal Tehnik Lingkungan*, 21(1), 48–56.
- [30] Gelardiansyah, S., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2015). Kelarutan Ozon pada Proses Ozonisasi Konvensional dan Advanced Oxidation Process (O₃/H₂O₂) pada Lindi Effluent Pengolahan. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 3(2), 1–10. [view/734](#)
- [31] Ikehata, K., & Li, Y. (2018). Ozone-Based Processes. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 115–134). X
- [32] Fadiyah, M. A., Sururi, M. R., & Ainun, S. (2017). Pengolahan Lindi dengan Menggunakan Advanced Oxidation Process (AOP) dengan Variasi Debit Udara. *Reka Lingkungan*, 5(1), 1–9.
- [33] cEnjarlis, & Hardi, J. (2010). Aplikasi Advance Oxidation Processes (AOPs) Berbasis O₃ / GAC Pada Pengolahan Limbah Cair Industri Tapioka Pendahuluan Metodologi Penelitian. *Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo 2010*.
- [34] Ayuningtyas, E. (2020). Penurunan Kadar Warna dan Fenol Air Limbah Batik Menggunakan Metode Advanced Oxidation Processes (AOPs) Berbasis Ozon-GAC. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 20(2), 31–37.
- [35] Fauzi, A. R., & R., T. A. (2018). Kombinasi fenton dan Fotokatalis sebagai Alternatif Pengolahan Limbah Batik. *JURNAL ENVIROTEK*, 10(1).
- [36] Dewi, S. H., & Wardiyati, S. (2015). Optimasi Proses Degradasi Limbah Warna Oleh Katalis Heterogen Fe₃O₄ /Sio₂ Menggunakan Metode Foto Fenton. *Prosiding Seminar Nasional XXIV “ Kimia Dalam Industri Dan* Torres-Palma, R. A., & Serna-Galvis, E. A. (2018). Sonolysis. In *Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment* (pp. 177–213). Elsevier.
- [37] Lesa, W. S., Ali, M., & Rosariawari, F. (2020). Proses Fotofenton dalam Reaktor Resirkulasi untuk Menyingkirkan Beban Pencemar pada Lindi. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 6(1), 54–65.
- [38] Wardiyati, S., Hasnah, S. H., & Fisli, A. (2012). Dekolorisasi Limbah Industri Batik Menggunakan Proses Fenton dan Foto Fenton. *Indonesian Journal of Materials Science*, 14(2), 131–135.
- [39] Priyadi, A. R., & J. A. R., N. R. (2019). Penurunan Kadar COD dan Warna Limbah Industri Tekstil dengan Metode Elektro-fenton. *JURNAL ENVIROTEK*, 1(2), 14–23.
- [40] Paramo-Vargas, J., Camargo, A. M. E., Gutierrez-Granados, S., Godinez, L. A., & Peralta-Hernandez, J. M. (2015). Applying electro-Fenton process as an alternative to a slaughterhouse effluent treatment. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 754, 80–86.
- [41] Putri, F. A., Sarto, & Yuliansyah, A. T. (2020). Pengaruh Variasi Rasio H₂O₂ / COD dan Tegangan Terhadap Penurunan COD Air Limbah Rumah Sakit dengan Metode Elektro – Fenton. *Jurnal Chemurgy*, 4(2), 15–23.
- [42] Agustina, T. E., Bustomi, A., & Manalaoon, J. (2016). Pengaruh konsentrasi TiO₂ dan konsentrasi limbah pada proses pengolahan limbah pewarna sintetik procion red dengan metode UV/Fenton/TiO₂. *Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya*, 22(1), 65–72. <http://jtk.unsri.ac.id>