

***A REVIEW ON APPLICATION OF ADVANCED OXIDATION PROCESSES (AOPs)
FOR TANNERY WASTEWATER TREATMENT***

Muhammad Sholeh*, Ike Setyorini
Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik, Badan Pengkajian Kebijakan, Iklim, dan Mutu Industri
Kementerian Perindustrian RI
*E-mail: muhammad-sholeh@kemenperin.go.id

ABSTRACT

Conventional wastewater treatment is not sufficient to treat tannery wastewater. Many organic pollutants are difficult to degrade biologically and need further treatment such as by advanced oxidation processes (AOPs). This review summarizes and discusses the state of the art of AOPs utilization for tannery wastewater, namely: Fenton oxidation, UV irradiation, sonication, ozonation, and combinations of these methods.

Keywords: *Advanced oxidation processes, wastewater, tannery.*

TINJAUAN PENGGUNAAN *ADVANCED OXIDATION PROCESSES* (AOPs) UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI PENYAMAKAN KULIT

Muhammad Sholeh*, Ike Setyorini

Balai Besar Kulit, Karet, dan Plastik, Badan Pengkajian Kebijakan, Iklim, dan Mutu Industri
Kementerian Perindustrian RI

*E-mail: muhammad-sholeh@kemenperin.go.id

ABSTRAK

Pengolahan air limbah industri penyamakan kulit tidak cukup dengan cara konvensional. Polutan organik yang sulit didegradasi secara biologis perlu penanganan lanjutan diantaranya dengan *advanced oxidation processes* (AOPs). Tinjauan ini merangkum dan mendiskusikan *state of the art* penggunaan AOPs untuk pengolahan air limbah industri penyamakan kulit, yaitu: metode oksidasi Fenton, elektrooksidasi, iradiasi UV, sonikasi, ozonasi, dan kombinasi beberapa metode tersebut.

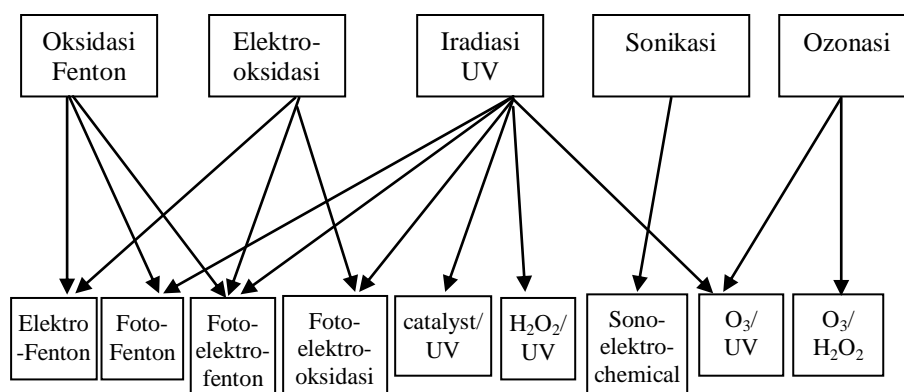
Kata kunci: *Advanced oxidation processes*, air limbah, penyamakan kulit.

PENDAHULUAN

Industri penyamakan kulit merupakan industri yang mengolah kulit mentah menjadi kulit jadi menggunakan bahan penyamak. Ada tiga tahapan dalam kegiatan penyamakan kulit yaitu proses pengerjaan basah (*beam house*), proses penyamakan (*tanning*), dan penyelesaian akhir (*finishing*). Masing-masing tahapan memiliki beberapa proses yang menggunakan bahan-bahan kimia dan air dalam jumlah banyak yang menghasilkan limbah cair maupun padat yang berpotensi mencemari lingkungan air, tanah dan udara. Kisaran pemakaian air pada penyamakan kulit yaitu 30-40 liter/kg bahan mentah (Lofrano *et al.*, 2007). Secara umum air limbah yang dihasilkan mengandung garam, sisa daging, bulu, bahan penyamak, cat, sulfida, minyak/lemak, dan surfaktan.

Secara garis besar pengolahan limbah penyamakan kulit secara konvensional meliputi pemisahan padatan kasar, segregasi, equalisasi, koagulasi, pengolahan limbah cair aerob dan anaerob (Yusuf, 2011). Beberapa polutan bersifat *recalcitrant* sehingga memerlukan pengolahan lanjutan agar memenuhi baku mutu yang ditetapkan pemerintah.

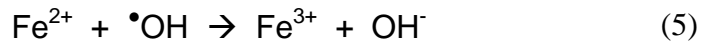
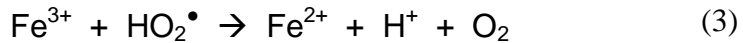
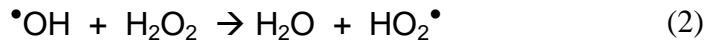
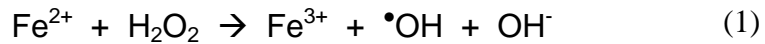
AOPs merupakan teknik oksidasi dengan memanfaatkan spesies sangat reaktif, misalnya radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$). Cakupan teknologi AOPs cukup luas dan telah digunakan dalam pengolahan air limbah selama satu dekade terakhir (Antonopoulou *et al.*, 2014; Ayoub *et al.*, 2010; Karci, 2014). Terdapat beragam tipe AOPs dengan basis reaksi yaitu: oksidasi Fenton, elektrooksidasi, iradiasi UV, sonikasi, dan ozonasi. Kombinasi dan variasi dari kelima tipe tersebut yang telah diteliti penggunaannya untuk mengolah air limbah industri penyamakan kulit terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Ragam tipe AOPs yang telah diteliti penggunaannya untuk mengolah air limbah industri penyamakan kulit

OKSIDASI FENTON

Reagen Fenton adalah campuran FeSO_4 dengan H_2O_2 . Mekanisme pembentukan radikal bebas $\cdot\text{OH}$ yaitu sebagai berikut (Vatanpour *et al.*, 2009):



Reaksi utama pada oksidasi Fenton adalah Persamaan (1). Ion besi (II) dioksidasi menjadi ion besi (III) menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$). Ion besi (II) diregenerasi dengan Persamaan (3), sehingga dalam hal ini ion besi bertindak sebagai katalis. Terlihat pada Persamaan (2), hidrogen peroksida selain menghasilkan radikal hidroksil juga menangkap radikal hidroksil membentuk radikal hidropersil ($\text{HO}_2\cdot$) yang relatif kurang sensitif dalam menyerang organik. Hidrogen peroksida mengalami dekomposisi menurut persamaan (6) sehingga mengurangi efisiensi penggunaannya (Babuponnusami and Muthukumar, 2014).



Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode oksidasi fenton terangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode oksidasi fenton

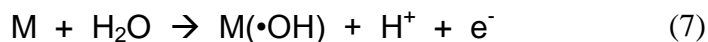
No	Type AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1	Oksidasi Fenton	pH=4,0; $\text{H}_2\text{O}_2=14,0$ mM; $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+}=10,6$; waktu reaksi= 3 j	Penurunan COD=55,87%	Wang et al. (2014)
2	Oksidasi Fenton	Waktu reaksi= 4 j; pH=3,5; $\text{H}_2\text{O}_2:\text{Fe}^{2+}=264,7$ mmol/g	Penurunan COD=78%	Sekaran et al. (2012)
3	Oksidasi Fenton	pH=3; $\text{H}_2\text{O}_2=300$ mg/L; $\text{Fe}^{2+}=500$ mg/L	Penurunan DOC=78%	Thankappan et al. (2014)
4	Oksidasi Fenton	pH=3; $\text{H}_2\text{O}_2=0,001$ mL/L; $\text{FeSO}_4=0,1$ g/L	Penurunan BOD=81,3%; COD=78,6%	Ramani and Sekaran (2006)

Lanjutan Tabel 1.

No	Tipe AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
5	Oksidasi Fenton	pH=3,5; H ₂ O ₂ =100-500 mg/L; FeSO ₄ =50-240 mg/L	Penurunan COD=82% pada H ₂ O ₂ =500 mg/L	Schrank et al. (2005)
6	Oksidasi Fenton	pH=2,5-3,5; H ₂ O ₂ =111 g/L; FeSO ₄ = 6 g/L T=30°C; t=30 menit	Penurunan COD=40,44%	Mandal et al. (2010)
7	Oksidasi Fenton	pH=3 optimum ratio H ₂ O ₂ /FeSO ₄ =600/500 (mg/mg)	Penurunan COD=80-90 %	Lofrano et al. (2007)
8	Oksidasi Fenton	FeSO ₄ = 0,2 %, H ₂ O ₂ = 120 ppm, dan pH = 4	Penurunan COD=68%	Sholeh dkk. (2013)

ELEKTRO-OKSIDASI

Dalam proses elektro-oksidas, polutan organik didegradasi dalam sel elektrolisis dengan potensial sel yang tinggi dengan mekanisme pembentukan hasil antara M(•OH) pada oksidasi air di permukaan anode M sesuai Persamaan (7) berikut (Isarain-Chavez *et al.*, 2014; Szpyrkowicz *et al.*, 2005):



Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode elektro-oksidas terangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode elektro-oksidas

No	Tipe AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1	Elektrooksidas	Katode=besi; anode=BDD; arus=111 mA cm ⁻² ;	Penurunan: TOC=64,9%	Isarain-Chavez et al. (2014)
2	Elektrooksidas	Elektrode kerja= DSA; arus= 100 mA cm ⁻²	Penurunan: TOC=40,5%	Costa et al. (2008)
3	Elektrooksidas	Katode = stainless steel; anode = DSA; arus= 20 mA cm ⁻²	Penurunan: TOC=45%; COD=60%	Costa and Olivi (2009)

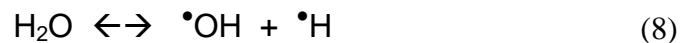
IRADIASI UV

Degradasi oleh cahaya dapat berupa secara langsung maupun tidak langsung. Dalam fotolisis langsung, molekul menyerap radiasi matahari yang menyebabkan terurainya molekul, sementara fotolisis tidak langsung melibatkan molekul alami seperti nitrat yang menghasilkan spesies reaktif antara lain, radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) atau radikal alkil peroxy ($\bullet\text{OOR}$) di bawah radiasi matahari (Fatta-Kassinou et al., 2011).

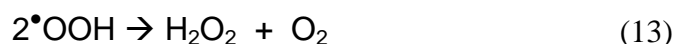
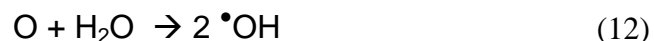
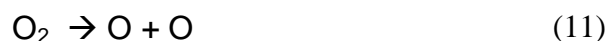
Sauer et al. (2006) melaporkan bahwa air limbah sintesis industri penyamakan kulit yang mengandung Direct Black 38 pada kondisi operasi pH 2,5; lampu UV berdaya 15 W; dan waktu tinggal 3 j, mengalami penurunan COD=7,8%, N-NH₄=88,1%, dan warna=69%.

SONIKASI

Air mengalami sonolisis bila terpapar radiasi ultrasonik yang menghasilkan hidrogen peroksida sesuai dengan reaksi (Svitelska et al., 2004):



Jika larutan jenuh dengan oksigen, radikal peroksil dan hidroksil yang lebih banyak terbentuk dalam fase gas dari gelembung mikro (pada dekomposisi molekul oksigen), dan rekombinasi terbentuk pada bagian yang lebih dingin (lapisan antarmuka gelembung dengan larutan) menghasilkan H₂O₂ tambahan (Ince et al., 2001):

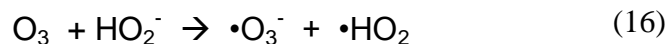
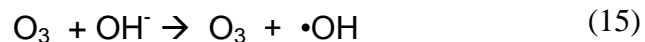
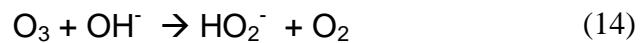


Menurut Shi et al. (2002), pemaparan ultrasonik selama 60 detik dapat meningkatkan penurunan COD 10-37% pada proses flokulasi air limbah industri penyamakan kulit.

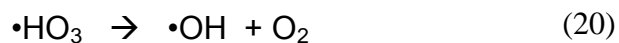
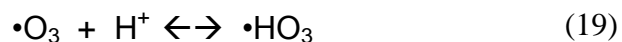
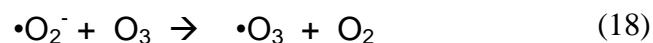
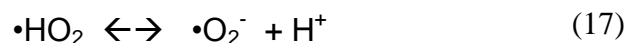
OZONASI

Ozon merupakan oksidan kuat dengan potensial oksidasi 2,07 V. Pada kondisi alkalin dengan larutan mengandung ion karbonat, ozon mengalami rangkaian reaksi berikut (Sillanpaa, 2011):

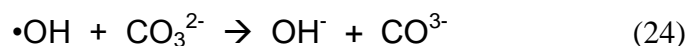
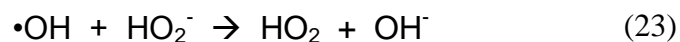
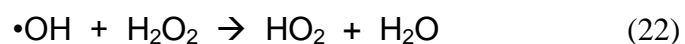
Inisiasi



Propagasi



Terminasi



Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode ozonasi terangkum pada Tabel 3.

Tabel 3. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode ozonasi

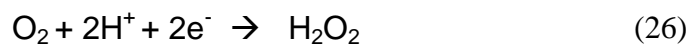
No	Type AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1	Ozonasi	Flowrate ozon 1,2 l/menit (Konsentrasi ozon=0,5 g/m ³)	COD=81-85%; BOD=40%	Balakrishnan et al. (2002)
2	Ozonasi	Flowrate ozon 3 g/menit	Penurunan warna=98% COD=34,9%	Srinivasan et al. (2012)
3	Ozonasi	Flowrate ozon 1g/j; pH=7	Penurunan tanin=98% COD=91%	Rema et al. (2010)

Lanjutan tabel 3.

No	Tipe AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
4	Ozonasi	Flowrate ozon 1 g O ₃ /j pH=8	Penurunan COD= 97 % Amoniak= 98 % TSS= 99,9 %	Di laconi et al. (2002)
5	Ozonasi	Flowrate 0,25 m ³ O ₃ /j	Penurunan COD= 91 % BOD ₅ = 99 % TSS= 96 %	Di laconi et al. (2009)
6	Ozonasi	Flowrate= 15 g O ₃ /j Waktu = 120 menit	Penurunan: COD= 70 % pada pH 6 dan 9	Houshyar et al. (2012)
7	Ozonasi	Flowrate 200 mg/menit pH= 7,5	Penurunan: COD=53,9 %	Pophali et al. (2011)
8	Ozonasi	pH= 11	Penurunan: Maks COD=92 %	Preethi et al. (2009)

ELEKTRO-FENTON

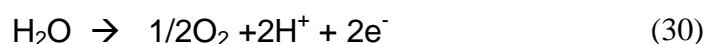
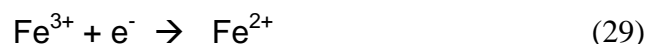
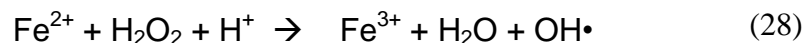
Metode elektro-Fenton menghasilkan Fe²⁺ dan/atau H₂O₂ dengan proses elektrokimia. Katode *carbon felt*, *carbon-PTFE* O₂ *diffusion*, BDD, mereduksi O₂ dengan persamaan (26) berikut (Isarain-Chavez et al., 2014):



Anode besi teroksidasi dengan persamaan (27) berikut:



Radikal •OH diperoleh dari reduksi elektrokimia simultan O₂ dengan kehadiran ion besi sebagai katalis (Sharma et al., 2011).



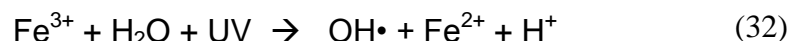
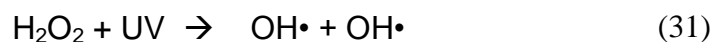
Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode elektro-fenton terangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode elektrofenton

No	Tipe AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1.	Elektro-Fenton	Katode = besi; anode = besi; pH= 7,4; arus= 33,3 mA m ⁻² ; H ₂ O ₂ = 1670-5830 mg/l	COD = 54%; S=85%	Apaydin <i>et al.</i> (2009)
2	Elektro-Fenton	Katode=Ti(Pt); anode= besi;	COD=90%	Boye el al. (2009)
3	Elektro-Fenton	Katode=BDD; anode=BDD; arus=111 mA cm ⁻² ; Fe ²⁺ = 3 mM	TOC=72%	Isarain-Chavez <i>et al.</i> (2014)
4	Elektro-Fenton	Katoda= grafit Anoda= Ti/SnO ₂ /PdO ₂ /RuO ₂ 1,5 V; t= 55 menit	Penurunan: COD=72,9 %	Naumczyk & Kucharska, (2011).
5	Elektro-Fenton	Katoda= besi Anoda= besi pH=3;5 H ₂ O ₂ = 840-5010 mg/l variasi	Penurunan COD= 60-70 % 10 menit pada beberapa variasi H ₂ O ₂	Kurt <i>et al.</i> (2007)

FOTO-FENTON

Dalam proses foto-Fenton, reaksi Fenton dipercepat dengan memaparkan cairan dengan sinar UV. Reaksi yang terjadi sebagai berikut (Sharma *et al.*, 2011):



Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode ini terangkum pada Tabel 5.

Tabel 5. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode foto-fenton

No	Tipe AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1	Foto-Fenton	FeSO ₄ ; H ₂ O ₂ =30% dengan radiasi matahari jam 11-12 am	Penurunan COD= 80 % 120 menit	Dantas (2013)
2.	Foto-Fenton	pH=3; Fe ²⁺ =0,5 g/L; H ₂ O ₂ =30 g/L; radiasi matahari 120 menit	Penurunan COD=97,9%; TSS=65,4%	Modenes et al (2012)
3.	Foto-Fenton	pH=3; FeSO ₄ =750 mg/L; H ₂ O ₂ =300 mg/L; radiasi UV 16 W; t=5 menit	Penurunan COD=82%	Lofrano et al. (2007b)

FOTOELEKTRO-OKSIDASI

Metode ini menggabungkan penggunaan iradiasi UV dengan elektro-oksidasi. Rodriguez et al. (2008) menggunakan lampu UV 400 W, elektrode DSA untuk katode dan anode, densitas arus listrik 36 mA cm⁻², dan waktu 24 jam untuk mengolah limbah keluaran UPAL industri penyamakan kulit konvensional. Penurunan polutan yang diperoleh yaitu COD 87,3%, BOD 94,7%, dan N-NH₃ 99,9%.

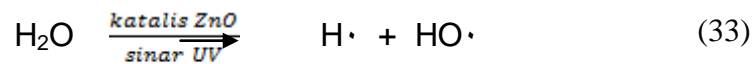
FOTOELEKTRO-FENTON

Dalam proses fotoelektro-Fenton, reaksi elektro-Fenton dipercepat dengan memaparkan cairan dengan sinar UV. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode ini telah dilakukan oleh Isarain-Chavez et al. (2014) dengan katode dan anode BDD, arus 111 mA cm⁻², panjang gelombang lampu UV 360 nm selama 3 jam. Hasil yang diperoleh yaitu penurunan TOC sebesar 74,8%.

FOTOKATALISIS

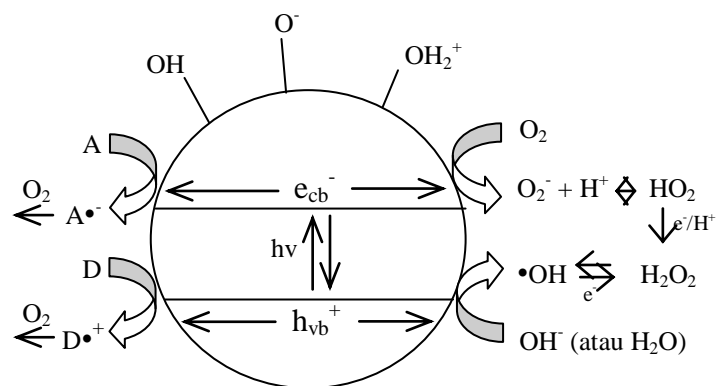
Zn based /UV

Katalis ZnO yang diradiasi dengan sinar UV mampu memecah molekul air menghasilkan radikal hidroksida ($\text{HO}\cdot$) dan radikal H. Radikal hidroksida menjadi zat pendegradasi yang akan menyerang berbagai gugus fungsi dalam larutan uji sehingga biodegradasi dapat dilakukan secara maksimal.



TiO₂/UV

Mekanisme reaksi fotokatalisis terlihat pada Gambar 2 (Castiello, 2009):



Gambar 2. Mekanisme reaksi fotokatalisis.

Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode fotokatalisis terangkum pada Tabel 6.

Tabel 6. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode fotokatalisis.

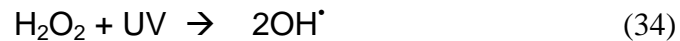
No	Type AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1	Fotokatalisis	Katalis=TiO ₂ supported activated carbon; UV=254 nm, 125 W; pH=2,5	COD=87%	Aruldoss <i>et al.</i> (2011)
2	Fotokatalisis	Katalis: TiO ₂ supported on glass microspheres; λ =600 nm;	COD=9%	Castiello <i>et al.</i> (2009)

Lanjutan tabel 6.

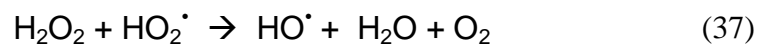
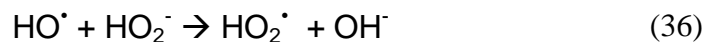
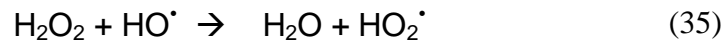
No	Tipe AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
3	Fotokatalisis	pH=2,5; UV lamp = 15 W; waktu tinggal 3 j; katalis=TiO ₂	Penurunan: COD=82% N-NH ₄ =80% Warna=91%	Sauer et al. (2006)
4	Fotokatalisis	pH=2,5; UV lamp = 15 W; waktu tinggal 3 j; H ₂ O ₂ =20 mg/L ; katalis = TiO ₂	Penurunan: COD=68% N-NH ₄ =93% Warna=98%	Sauer et al. (2006)
5	Fotokatalisis	UV/TiO ₂ ; 150 W; pH=2 ; t=120 menit opt	C/Co= 0,5 (campuran Cr VI dan dye) C/Co= 0,85 (Cr VI)	Schrank et al. (2002)
6	Fotokatalisis	Fe ³⁺ / Nano TiO ₂ ; low UV 30 Watt; pH= 6,7; H ₂ O ₂ =0,3 %, t opt=4 jam	Penurunan pada UV P tinggi COD: 85,8% pada 40 menit radiasi CrVI: 84,62% pada 110 menit radiasi	Jia et al. (2009)
7	Fotokatalisis	ZnO-ZnFe ₂ O ₄ ZnO-ZnFe ₂ O ₄ /AC AC t=60 menit	BOD ₅ removal=84% BOD ₅ removal=85% BOD ₅ removal=67%	Mohammed et al. (2013)
8	Fotokatalisis	Waktu reaksi = 4 j; pH=8,0; katalis ZnO	Penurunan: COD=97,6% BOD=99,8% TOC=99,93%	Hasegawa et al., (2014)

H₂O₂/UV

Fotolisis dengan menggunakan kombinasi H₂O₂/UV yang menghasilkan radikal •OH yang reaktif dengan polutan organik beracun. Reaksi yang terjadi adalah (Schrank *et al*, 2005):



Reaksi lain yang mungkin terjadi tergantung dengan kondisi yang mendukung yaitu:



Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode ini terangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Penelitian pengolahan air limbah industri penyamakan kulit dengan metode H₂O₂/UV

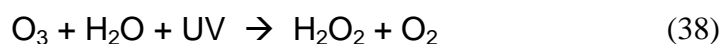
No	Type AOPs	Kondisi proses	Komentar	Referensi
1	H ₂ O ₂ /UV	pH=2,5; UV lamp = 15 W; waktu tinggal 3 j; H ₂ O ₂ =20 mg/L	Penurunan: COD=16% N-NH ₄ =83% Warna=83%	Sauer et al. (2006)
2	H ₂ O ₂ /UV	pH=3; waktu tinggal 3 j; H ₂ O ₂ =300 mg/L	Penurunan: TOC= 60 %	Schrank et al. (2005)
3	H ₂ O ₂ /UV	waktu tinggal 4 j; H ₂ O ₂ =3000 mg/L; UV lamp=15 W, 254 nm	Penurunan: COD= 78 %	Naumczyk & Rusiniak (2005)

SONO-ELECTROCHEMICAL PROCESSES

Sono-elektrochemical proses adalah penggabungan metode sonikasi dengan elektrolisis. Farouk *et al*. (2013) meneliti pengurangan krom dan sulfat dalam limbah sintesis penyamakan kulit menggunakan ultrasonik dengan frekuensi 40 kHz, katode stainless steel dan timbal, anode titanium, tegangan 10 V, selama 2 jam. Penurunan krom dan sulfat berturut-turut 72,3% dan 45,2%.

O3/UV

Dalam proses ozon/UV, foton mengkonversi ozon dalam air menjadi oksigen dan peroksida. Kemudian peroksida bereaksi dengan ozon membentuk radikal OH. Reaksi yang terjadi sebagai berikut (Espuglas *et al*, 2001):



Schrank *et al.* (2004) menggunakan metode ini untuk mengolah limbah kulit keluaran unit pengolahan air limbah konvensional. Pada kondisi pH 11, lampu UV 15 W, O₃ 2,6 g/jam selama 30 menit, diperoleh penurunan COD 21%, TOC 13%, dan BOD 36%.

PERBANDINGAN TIAP METODE

Semua AOP memerlukan biaya cukup besar dalam pengoperasiannya (Rameshraj and Suresh, 2011). Perbandingan kelebihan dan kekurangan tiap metode AOPs terangkum pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan keunggulan dan kelemahan tiap metode AOP (Aziz and Mojiri, 2014; Audenaert, 2012; Dimitrevic, 2013; Isarain-Chavez *et al.*, 2014)

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Oksidasi Fenton	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak memerlukan alat khusus dan input energi untuk memproduksi radikal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bekerja optimum pada pH rendah • Memerlukan banyak bahan kimia • Timbul sludge
Elektro-oksidasi	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat memineralisasi bahan organik • Tidak memerlukan bahan kimia • Tidak menghasilkan polutan sekunder 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan biaya tinggi untuk pembelian dan pengoperasian unit elektro-oksidasi (\$ 5-11/m³)
Iradiasi UV	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak menimbulkan sludge • Mempunyai efek desinfektan • Mudah dioperasikan • Tidak menyisakan bahan berbahaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan biaya untuk pembelian dan pengoperasian lampu UV. • Sinar lampu tidak mampu menembus limbah yang keruh

Lanjutan tabel 8.

Metode	Kelebihan	Kekurangan
Sonikasi	<ul style="list-style-type: none"> • Metode sonikasi mudah digunakan. • Tidak membutuhkan tenaga kerja terampil.. • Peralatan tidak perlu banyak ruang. • Tidak perlu pengadukan, bahan kimia, pengaturan pH, dan penyaringan • Tidak menghasilkan sludge dan gas sisa • Tidak tergantung karakteristik air limbah 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan biaya untuk pembelian dan pengope-rasian unit sonicator • Menggunakan probe yang mahal • Perawatan probe harus hati-hati untuk mencegah erosi dan pitting •
Ozonasi	<ul style="list-style-type: none"> • Mempunyai efek desinfektan • Efektif menghilangkan bau dan rasa 	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak stabil, jadi harus dibangkitkan sesaat sebelum digunakan • Peralatan dan pengoperasiannya mahal • Timbulnya bromat yang bersifat karsinogenik

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Beragam AOPs untuk mengolah air limbah industri penyamakan kulit telah dilaporkan. Untuk dapat menentukan AOPs yang paling tepat masih memerlukan evaluasi ekonomi yang lengkap. Arah penelitian AOPs ke depan dapat dilakukan dengan mengoptimasi metode UV/H₂O₂ yang telah diaplikasikan pada skala pabrik di beberapa pengolahan air minum dan pembangkit listrik di Amerika dan Australia (Audenaert, 2012).

DAFTAR PUSTAKA

- Antonopoulou, M., Evgenidou, E., Lambropoulou, D., & Konstantinou, I. (2014). A review on advanced oxidation processes for the removal of taste and odor compounds from aqueous media. *Water research*, 53, 215-234.
- Apaydin, Ö., Kurt, U, and Gönüllü, M.T., 2009. An investigation on the treatment of tannery wastewater by electrocoagulation, *Global NEST Journal*, 11(4): 546-555.
- Aruldoss, U., Kennedy, L. J., Judith Vijaya, J., & Sekaran, G., 2011. Photocatalytic degradation of phenolic sytan using TiO₂ impregnated activated carbon. *Journal of colloid and interface science*, 355(1): 204-209.
- Audenaert, W. (2012). Ozonation and UV/hydrogen peroxide treatment of natural water and secondary wastewater effluent: experimental study and mathematical modelling (Doctoral dissertation, Ghent University).
- Ayoub, K., van Hullebusch, E. D., Cassir, M., & Bermond, A. (2010). Application of advanced oxidation processes for TNT removal: a review. *Journal of hazardous materials*, 178(1), 10-28.
- Aziz, H. A., & Mojiri, A. (Eds.). (2014). *Wastewater Engineering: Advanced Wastewater Treatment Systems*. IJSR Publications.
- Babuponnusami, A., & Muthukumar, K. (2014). A review on Fenton and improvements to the Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 557-572.
- Balakrishnan, P. A., Arunagiri, A., & Rao, P. G. (2002). Ozone generation by silent electric discharge and its application in tertiary treatment of tannery effluent. *Journal of Electrostatics*, 56(1), 77-86.
- Belay, A. A., 2010, Impact of Chromium from Tannery Effluent and Evaluation of Alternative Treatment Options, *Journal of Environmental Protection*, 1, 53-58
- Boye, B., Sandonà, G., Giomo, M., Buso, A., & Farnia, G., 2009. Electro-fenton-based treatments of real effluents from tanning processes and landfills. *J. Environ. Eng. Manage.*, 19(5), 283-289.
- Castiello, D., Puccini, M., Salvadori, M., & Maurizia Seggiani, S., 2009. Treatment of Tannery Waste Waters Using Photocatalytic Process with Nanomolecular Materials, IULTCS XXX Congress, China.

- Costa, C. R., Botta, C. M., Espindola, E. L., & Olivi, P. (2008). Electrochemical treatment of tannery wastewater using DSA® electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1), 616-627.
- Costa, C. R., & Olivi, P. (2009). Effect of chloride concentration on the electrochemical treatment of a synthetic tannery wastewater. *Electrochimica Acta*, 54(7), 2046-2052.
- Dantas, T. L. P., José, H. J., & Moreira, R. F. P. M. (2003). Fenton and photo-Fenton oxidation of tannery wastewater. *Acta Scientiarum Tehnology*, 25(1), 91-95.
- Di Iaconi, C., Lopez, A., Ramadori, R., Di Pinto, A. C., & Passino, R. (2002). Combined chemical and biological degradation of tannery wastewater by a periodic submerged filter (SBBR). *Water research*, 36(9), 2205-2214.
- Di Iaconi, C., Ramadori, R., & Lopez, A. (2009). The effect of ozone on tannery wastewater biological treatment at demonstrative scale. *Bioresource technology*, 100(23), 6121-6124.
- Farooq, R., Durrani, M., Ahmed, Z., Gilani, M. A., Mahmood, Q., Shaukat, S. F., ... & Yaquob, A. (2013). Treatment of Tanneries Waste Water by Ultrasound Assisted Electrolysis Process. *J. Chem. Soc. Pak*, 35(3), 599.
- Fatta-Kassinos, D., & Vasquez, M. I. Kü mmerer, K., 2011. Transformation products of pharmaceuticals in surface waters and wastewater formed during photolysis and advanced oxidation processes e Degradation, elucidation of byproducts and assessment of their biological potency. *Chemosphere*, 85(5), 693.
- Hasegawa, M. C., Daniel, J. F. D. S., Takashima, K., Batista, G. A., & da Silva, S. M. (2014). COD removal and toxicity decrease from tannery wastewater by zinc oxide-assisted photocatalysis: a case study. *Environmental Technology*, 35(13), 1589-1595.
- Houshyar, Z., Khoshfetrat, A. B., & Fatehifar, E. (2012). Influence of ozonation process on characteristics of pre-alkalized tannery effluents. *Chemical Engineering Journal*, 191, 59-65.
- Ince, N. H., Tezcanli, G., Belen, R. K., & Apikyan, I. G. (2001). Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 29(3), 167-176.

- Isarain-Chávez, E., de la Rosa, C., Godínez, L. A., Brillas, E., & Peralta-Hernández, J. M. (2014). Comparative study of electrochemical water treatment processes for a tannery wastewater effluent. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 713, 62-69.
- Jia, S., Peiyao, X., Ya, Z., and Yana, F. 2009. Research on Treating Tannery Wastewater by Using Nanometer-sized TiO₂/Glass Thin Film, 2009 International Conference on Energy and Environment Technology
- Karci, A. (2014). Degradation of chlorophenols and alkylphenol ethoxylates, two representative textile chemicals, in water by advanced oxidation processes: The state of the art on transformation products and toxicity. *Chemosphere*, 99, 1-18.
- Kurt, U., Apaydin, O., & Gonullu, M. T. (2006). A Research on treatability of leather industry wastewater by using electro-fenton process, IULTCS 2006, Turki.
- Kurt, U., Apaydin, O., & Gonullu, M. T. (2007). Reduction of COD in wastewater from an organized tannery industrial region by Electro-Fenton process. *Journal of hazardous materials*, 143(1), 33-40.
- Lofrano, G., Meriç, S., Belgiorno, V., & Napoli, R. (2007a). Fenton's oxidation of various-based tanning materials. *Desalination*, 211(1), 10-21.
- Lofrano, G., Meriç, S., Belgiorno, V., Nikolau, A., & Napoli, R. (2007b). Fenton and photo-Fenton treatment of a synthetic tannin used in leather tannery: a multi approach study, 9th International Workshop on Termination, Paris.
- Lofrano, G., Meric, S., Inglese, M., Nikolau, A., & Belgiorno, V. (2010). Fenton oxidation treatment of tannery wastewater and tanning agents: synthetic tannin and nonylphenol ethoxylate based degreasing agent. *Desalination and Water Treatment*, 23(1-3), 173-180.
- Mandal, T., Dasgupta, D., Mandal, S., & Datta, S. (2010). Treatment of leather industry wastewater by aerobic biological and Fenton oxidation process. *Journal of hazardous materials*, 180(1), 204-211.
- Módenes, A. N., Espinoza-Quiñones, F. R., Borba, F. H., & Manenti, D. R. (2012). Performance evaluation of an integrated photo-Fenton–Electrocoagulation process applied to pollutant removal from tannery effluent in batch system. *Chemical Engineering Journal*, 197, 1-9.

- Mohammed, H. A., Hamza, A., Adamu, I. K., Ejila, A., Waziri, S. M., & Mustapha, S. I. (2013). BOD5 removal from tannery wastewater over ZnO-ZnFe₂O₄ composite photocatalyst supported on activated carbon. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 4(6), 80-86.
- Naumczyk, J., & Rusiniak, M. (2005). Physicochemical and chemical purification of tannery wastewaters. *Polish Journal of Environmental Studies*, 14(6), 789-797.
- Naumczyk, J., & Kucharska, M. (2011). Tannery wastewater treatment by anodic electrooxidation coupled with electro-Fenton process. *Environment Protection Engineering*, 37(3), 47-54.
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2004). Electrochemical oxidation as a final treatment of synthetic tannery wastewater. *Environmental science & technology*, 38(20), 5470-5475.
- Preethi, V., Parama Kalyani, K. S., Iyappan, K., Srinivasakannan, C., Balasubramaniam, N., & Vedaraman, N. (2009). Ozonation of tannery effluent for removal of cod and color. *Journal of hazardous materials*, 166(1), 150-154.
- Pophali, G. R., Hedau, S., Gedam, N., Rao, N. N., & Nandy, T. (2011). Treatment of refractory organics from membrane rejects using ozonation. *Journal of hazardous materials*, 189(1), 273-277.
- Ramani, K. and Sekaran, G., 2006. Fenton activated carbon catalytic oxidation (FACCO) system for the treatment of soak liquor for reuse application, IULTCS II, Istanbul, Turki.
- Rema, T., Parivallal, B., & Ramanujam, R. A. (2010). Studies on degradation of Syntan used in leather tanning process using ozone. *Int J Environ Sci Develop*, 1(3), 264-7.
- Rodrigues, M. A. S., Amado, F. D. R., Xavier, J. L. N., Streit, K. F., Bernardes, A. M., & Ferreira, J. Z. (2008). Application of photoelectrochemical–electrodialysis treatment for the recovery and reuse of water from tannery effluents. *Journal of Cleaner Production*, 16(5), 605-611.
- Sauer, T. P., Casaril, L., Oberziner, A. L. B., José, H. J., & Moreira, R. D. F. P. M. (2006). Advanced oxidation processes applied to tannery wastewater containing Direct Black 38—Elimination and degradation kinetics. *Journal of hazardous materials*, 135(1), 274-279.

- Schrank, S. G., José, H. J., & Moreira, R. F. P. M. (2002). Simultaneous photocatalytic Cr (VI) reduction and dye oxidation in a TiO₂ slurry reactor. *Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry*, 147(1), 71-76.
- Schrank, S. G., José, H. J., Moreira, R. F. P. M., & Schröder, H. F. (2004). Elucidation of the behavior of tannery wastewater under advanced oxidation conditions. *Chemosphere*, 56(5), 411-423.
- Schrank, S. G., José, H. J., Moreira, R. F. P. M., & Schröder, H. F. (2005). Applicability of Fenton and H₂O₂/UV reactions in the treatment of tannery wastewaters. *Chemosphere*, 60(5), 644-655.
- Sekaran, G., Karthikeyan, S., Evvie, C., Boopathy, R., & Maharaja, P. (2013). Oxidation of refractory organics by heterogeneous Fenton to reduce organic load in tannery wastewater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(2), 245-253.
- Sillanpää, M. E., Agustiono Kurniawan, T., & Lo, W. H. (2011). Degradation of chelating agents in aqueous solution using advanced oxidation process (AOP). *Chemosphere*, 83(11), 1443-1460.
- Sharma, S., Ruparelia, J. P., & Patel, M. L. (2011, December). A general review on advanced oxidation processes for waste water treatment. In *International conference on current trends in technology*.
- Sholeh, M., Supraptiningsih, and Arsitika, W. P., 2013, Penurunan COD air limbah industri penyamakan kulit menggunakan reagen fenton, *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, 29(1):31-36.
- Shi, B., Li, G., He, Y., Lu, Z. And Gao, X., 2002. Ultrasonic removal of organic pollutants in tannery wastewater, *The Journal of the American Leather Chemists Association*, 97(3): 98-101.
- Srinivasan, S. V., Mary, G. P. S., Kalyanaraman, C., Sureshkumar, P. S., Balakameswari, K. S., Suthanthararajan, R., & Ravindranath, E. (2012). Combined advanced oxidation and biological treatment of tannery effluent. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14(2), 251-256.
- Svitelska, G. V., Gallios, G. P., & Zouboulis, A. I. (2004). Sonochemical decomposition of natural polyphenolic compound (condensed tannin). *Chemosphere*, 56(10), 981-987.

- Szpyrkowicz, L., Kaul, S. N., Neti, R. N., & Satyanarayan, S. (2005). Influence of anode material on electrochemical oxidation for the treatment of tannery wastewater. *Water research*, 39(8), 1601-1613.
- Thankappan, R., Nguyen, T. V., Srinivasan, S. V., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Loganathan, P. (2014). Removal of leather tanning agent syntan from aqueous solution using Fenton oxidation followed by GAC adsorption. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2014.03.008>.
- Vatanpour, V., Daneshvar, N., Rasoulifard, H., 2009. Electro-fenton Degradation of Synthetic Dye Mixture: Influence of Intermediate, *J. Environ. Eng. Manage.*, 19(5): 277-282.
- Wang, Y., Li, W., Irini, A., & Su, C. (2014). Removal of organic pollutants in tannery wastewater from wet-blue fur processing by integrated Anoxic/Oxic (A/O) and Fenton: Process optimization. *Chemical Engineering Journal*, 252, 22-29.
- Wang, Y., Wang, Q., Hou, L., Jiang, Y., Du, D., Du, T., and Liu, Y., 2009. Photocatalytic Degradation of TanneryWastewater by UsingMWCNTs/TiO₂ Nanocomposites, Kongres IULTCS XXX, China.
- Yusuf, Y., 2011, Industri Penyamakan Kulit dan Dampaknya bagi Kesehatan Lingkungan, *Sigma Journal*, 3(1).