

**POTENSI PEMANFAATAN AIR LIMBAH PEMUCAT INDUSTRI TENUN
ATBM UNTUK MENURUNKAN KEBUTUHAN OKSIGEN KIMIAWI (KOK)
AIR LIMBAH PEWARNAAN**

*(The Potency of Using Bleaching Wastewater to reduce Chemical Oxygen Demand (COD) in
Dyeing Wastewater of Traditional Weaving Industries)*

Sarto, I Made Bendiyasa, dan Yustina Rusnawati

Jurusan Teknik Kimia FT UGM
Jl. Grafika No.2, Yogyakarta 55281
E-mail : sarto@chemeng.ugm.ac.id

Diterima: 9 Juli 2012

Disetujui: 23 Agustus 2012

Abstrak

Kegiatan tenun ATBM di Gamplong menghasilkan air limbah terutama dari proses pewarnaan dan proses pemucatan. Bahan pewarna merupakan senyawa kompleks dan relatif stabil sehingga sulit ditangani. Proses oksidasi lanjut telah terbukti mampu menurunkan kadar bahan pewarna dalam air limbah. Penelitian ini mempelajari potensi air limbah pemucatan untuk menurunkan kadar bahan pewarna dalam air limbah pewarnaan.

Proses pencampuran air limbah pewarna dengan air limbah pemucatan dilakukan di dalam sebuah reaktor batch yang dilengkapi empat lampu UV masing-masing 10 Watt dan sebuah pengaduk magnet. Penurunan kadar zat warna dinyatakan dalam Kebutuhan Oksigen Kimiawi (KOK). Setiap jangka (interval) waktu tertentu, cuplikan air limbah sebanyak 2 mL diambil dari reaktor lalu dianalisis KOK-nya. Rasio volume limbah pewarnaan terhadap limbah pemucatan adalah 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, dan 1:3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil nisbah limbah pewarnaan dengan limbah pemucatan menghasilkan penurunan KOK semakin besar. Dengan volume limbah total 150 mL, potensi oksidasi limbah pemucatan setara dengan sekitar 2 mL hidrogen peroksida 50% dalam 150 mL air limbah.

Kata kunci: KOK, limbah pewarnaan, limbah pemucatan, proses oksidasi lanjut

Abstract

Traditional weaving activities in Gamplong produce wastewater, mainly from dyeing and bleaching processes. Dyes are complex compounds and relatively stable which is difficult to be managed. Advanced oxidation processes have proved to be able to decrease dyes content in the wastewater. The aim of this experiment is to study the potency of bleaching wastewater to reduce dyes content in dyeing wastewater.

The mixing process of those wastewater was conducted in a batch reactor which was equipped with 4 UV light of 10 W each and a magnetic stirrer. The mixing process was performed at ambient temperature and pressure. Dyes content in the wastewater was expressed in chemical oxygen demand (COD). Each run, total volume of wastewater of dyeing process or mixtures of dyeing process and bleaching process were 150 mL. At a certain time interval, 2 mL of treated wastewater was sucked up from the reactor, and then its COD content was analysed. The volume ratios of dyeing wastewater to bleaching wastewater investigated were 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, and 1:3. The experiment results showed that the COD conversion increases with the decreases of the ratio of dyeing wastewater to bleaching wastewater. The more H₂O₂ addition to the dyeing wastewater, the more COD reduction is. For the ratio of dyeing wastewater to bleaching wastewater 1:1, the higher the H₂O₂ 50% addition, the higher the reduction of COD is.

Keywords: COD, dyeing wastewater, bleaching waste water, advanced oxydation process

PENDAHULUAN

Dusun Gamplong di Wilayah Kabupaten Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta merupakan sentra kerajinan tenun rakyat dengan alat tenun bukan mesin (ATBM). Dalam proses produksinya, kegiatan tersebut menghasilkan air limbah terutama dari proses pemucatan dan proses pewarnaan. Pembuangan air limbah yang mengandung zat warna kadar tinggi merupakan suatu masalah terkenal terkait dengan aktifitas zat tersebut (Neppolian dkk, 2001). Di lingkungan, senyawa pewarna biasanya mengalami berbagai reaksi perubahan struktur kimia, dan dapat menghasilkan senyawa xenobiotik baru yang kemungkinan lebih bersifat racun dibandingkan senyawa induknya (Chung dan Cerniglia, 1992).

Upaya pengolahan limbah sudah dilakukan, yaitu menggunakan cara koagulasi dan flokulasi. Akan tetapi upaya ini kurang efektif dan menimbulkan masalah baru, yaitu dihasilkannya lumpur yang dikategorikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun. Pengolahan zat warna akan efektif jika dilakukan dengan cara mengubah sifatnya melalui penguraian senyawa tersebut, baik secara kimia maupun biologi. Dengan struktur kimia yang sangat kompleks dan sifatnya yang toksik, zat warna sulit didegradasi secara biologi. Dalam dasa warsa terakhir, banyak cara yang dikembangkan untuk mengolah limbah tersebut. Beberapa proses kimia, yang menggunakan pengoksidasi seperti ozon dan hidrogen peroksida telah memineralkan banyak bahan organik buatan. Akan tetapi, biaya terkait dengan oksidasi kimia sendiri sering menghambat upaya pengolahan air limbah. Suatu cara yang lebih potensial untuk dilakukan adalah penggabungan proses kimia dan biologi. Proses kimia digunakan sebagai pengolahan pendahuluan untuk meningkatkan biodegradabilitas polutan dalam air limbah (Parra dkk., 2000; Sarria dkk., 2001).

Oksidasi senyawa-senyawa organik dalam air dengan proses oksidasi lanjut menghasilkan produk organik teroksidasi dan asam-asam dengan berat molekul rendah yang lebih mudah terbiodegradasi (Marco dkk., 1997; Ledakowicz, 1998). Dengan proses oksidasi lanjut, senyawa-senyawa

toksik akan dihilangkan sehingga tidak menghambat karena toksisitasnya, dan lebih mudah terbiodegradasi. Proses oksidasi lanjut telah digunakan untuk mengolah limbah yang sulit terdegradasi secara biologi (Mokrin dkk., 1997). Kombinasi sinar ultra violet sebagai sumber energi dengan hidrogen peroksida telah banyak dipelajari (Juang dkk., 1997; Ghaly, dkk., 2001).

Proses oksidasi lanjut merupakan cara pengolahan limbah organik dengan proses oksidasi dengan cara menghasilkan oksidator kuat yang dapat mengoksidasi limbah organik berbahaya menjadi senyawa yang lebih aman bagi lingkungan. Prinsip proses oksidasi lanjut adalah menghasilkan radikal hidroksil, yang sangat reaktif dan mempunyai potensi oksidasi yang sangat tinggi (Mokrin dkk., 1997).

Glaze dan Chapin (1987) mendefinisikan proses oksidasi lanjut sebagai proses pengolahan limbah pada temperatur dan tekanan ambien, yang melibatkan radikal hidroksil dalam jumlah yang cukup. Radikal hidroksil yang dihasilkan digunakan untuk mengoksidasi senyawa organik menghasilkan senyawa-senyawa yang lebih sederhana. Radikal hidroksil merupakan spesies yang sangat reaktif yang menyerang sebagian besar molekul organik. Kinetika reaksinya umumnya merupakan order 1 terhadap konsentrasi radikal hidroksil dan konsentrasi spesies yang dioksidasi. Tetapan laju reaksinya berkisar antara $10^8 - 10^{11}$ L/mol/det, sementara konsentrasi radikal hidroksil berada antara 10^{-10} dan 10^{-12} mol/L, sehingga tetapan kecepatan reaksi orde 1 semu adalah antara 1 dan 10^4 /det (Glaze and Kang, 1989). Kecepatan penurunan KOK hasil penelitian Bendiyasa dkk. (2007) dan Bendiyasa dkk. (2011), mengikuti reaksi first order semu terhadap KOK. Hasil penelitian limbah pewarnaan dari dusun Gamplong di Wilayah Kabupaten Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta menunjukkan bahwa nilai konstanta laju reaksi dipengaruhi oleh pH awal. Munter dkk. (2001) menyebutkan bahwa radikal hidroksil merupakan oksidan yang jauh lebih kuat dari pada bahan kimia yang biasa digunakan untuk proses kimia tradisional, seperti ozon, hidrogen peroksida.

Hidrogen peroksida dikenal sebagai salah satu pengoksidasi kuat dan telah digunakan

di industri tekstil, elektronik dan pulp dan kertas (Kirk-Othmer, 1995). Kegiatan tenun ATBM di Gamplong memanfaatkan prinsip proses oksidasi pada proses pemucatan, yang menggunakan hidrogen peroksida sebagai senyawa pengoksidasi. Air bekas proses pemucatan diduga masih mengandung hidrogen peroksida, di samping senyawa pengotor hasil proses tersebut. Penelitian ini mempelajari potensi air limbah pemucatan sebagai pengoksidasi air limbah pewarnaan di Dusun Gamplong Wilayah Kabupaten Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta dengan prinsip proses oksidasi lanjut menggunakan sinar ultra violet. Penambahan hidrogen peroksida terhadap limbah pewarnaan juga dilakukan baik dengan maupun tanpa limbah pemucatan untuk mengevaluasi potensi tersebut.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah tekstil yang terdiri dari limbah pewarnaan dan pemucatan yang berasal dari industri tekstil alat tenun tanpa mesin (ATBM) di Gamplong, Sumber Rahayu, Moyudan, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta dan hidrogen peroksida. Limbah tekstil terdiri dari limbah pewarnaan berupa cairan berwarna kecoklatan, sedangkan limbah proses pemucatan berasal dari campuran antara 25 liter air dengan 1 liter hidrogen peroksida 50% yang mengandung hasil pemucatan. Hidrogen peroksida diperoleh dari PT Peroksida Indonesia Pratama.

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian adalah reaktor oksidasi lanjut dengan komponen utama berupa gelas beker 600 mL dan pengaduk magnetik, yang diletakkan di dalam kotak yang dilengkapi 4 buah lampu UV masing-masing 10 Watt. Rangkaian alat percobaan ditunjukkan pada Gambar 1.

Percobaan dilakukan dengan 3 skema perlakuan, yaitu pengaruh nisbah (rasio) jumlah limbah pewarnaan dengan limbah pemucatan terhadap penurunan kebutuhan oksigen kimiawi (KOK) untuk limbah

pewarnaan yang selanjutnya disebut Skema 1; penurunan KOK limbah pewarnaan akibat penambahan H_2O_2 (Skema 2), dan Skema 3 yaitu kombinasi Skema 1 dan Skema 2, yaitu penurunan KOK pada campuran limbah pewarnaan dan pemucatan dengan penambahan H_2O_2 . Ada 6 variasi nisbah limbah yang dievaluasi yaitu 150/0; 112,5/37,5; 100/50; 75/75; 50/100; dan 37,5/112,5 (dalam mL/mL). Skema 2 dilakukan untuk pembandingan kinerja Skema 1, yaitu tanpa limbah pemucatan tetapi ditambahkan H_2O_2 dengan variasi volume 0, 2, 4, 6, 8, dan 10 mL. Adapun Skema 3 dimaksudkan untuk menguji kemungkinan aplikasi di lapangan.

Secara umum, setiap percobaan limbah pewarnaan dicampur sesuai dengan skema dan variasi yang telah ditentukan dengan total volume limbah 150 mL dimasukkan ke dalam reaktor yang diikuti dengan pengadukan dengan kecepatan sama, dan penyalan lampu pada waktu yang sama. Cuplikan (sampel) diambil sebanyak 2 mL setiap periode pengambilan yang sudah ditentukan untuk dianalisis KOK-nya. Periode pengambilan sampel adalah mulai dari menit ke 0, 10, 25, 45 dan 70 terhitung sejak penyalan lampu. Data KOK dievaluasi untuk setiap kasus dan dibandingkan antarskema lalu dievaluasi nilai konstanta laju penurunan KOK-nya dengan pendekatan reaksi orde satu semu. Dalam proses batch, dengan anggapan volume tetap, neraca KOK-nya adalah

$$\frac{d(C_{KOK})}{dt} = k(C_{KOK}) \quad (1)$$

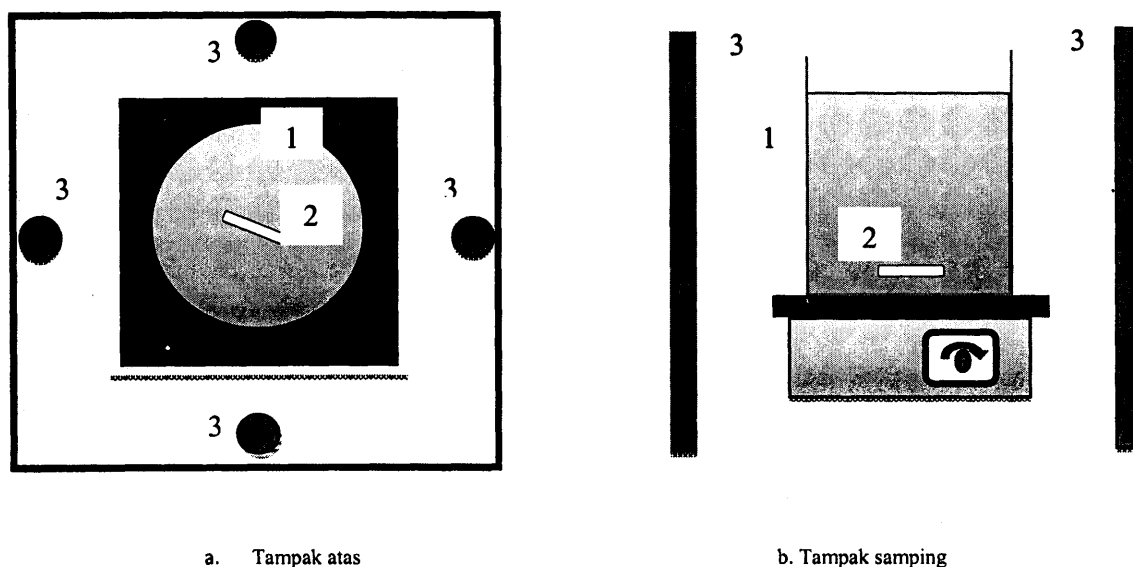
dengan

C_{KOK} = nilai KOK; k = konstanta laju penurunan KOK dan t = waktu

Jika konversi didefinisikan sebagai

$$x = \frac{C_{KOK}(t=0) - C_{KOK}(t=t)}{C_{KOK}(t=0)} \quad (2)$$

Bila persamaan (2) disubstitusikan pada persamaan (1), lalu diintegrasikan dengan keadaan awal dan batas berturut pada $x = 0$ dan $x = x$, didapat:

**Keterangan :**

1. Gelas beker
2. Pengaduk magnetik
3. Lampu UV

Gambar 1. Rangkaian Alat Percobaan

Daftar 1. Hasil Analisis KOK (mg/L) Variasi Perbandingan Volume antara Limbah Pewarnaan dengan Limbah Pemucatan (mL/mL)

Waktu, menit	LimbahPewarnaan/LimbahPemucat(mL/mL)					
	150/0	112,5/37,5	100/50	75/75	50/100	37,5/112,5
0	8598	8517	8543	8266	8181	7866
10	8487	7734	6549	5608	5276	4790
25	8432	7646	6439	5497	5165	4614
45	8432	7558	6383	5442	5110	4570
70	8321	7426	6273	5331	4999	4438

$$\ln(1-x) = kt \quad (3)$$

Persamaan (3) diselesaikan secara grafis, dengan membuat hubungan $\ln(1-x)$ lawan t , didapat garis lurus dengan tangen arah k

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dibahas untuk setiap skema, dengan perbandingan kinerja masing-masing skema. Nilai pengukuran KOK untuk Skema 1, Skema 2, dan Skema

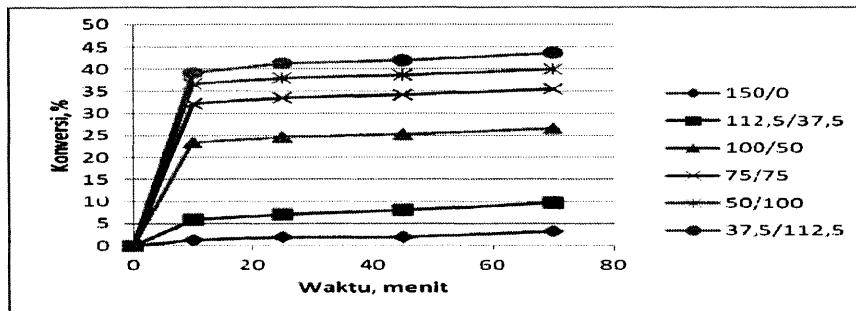
3 ditunjukkan berturut-turut pada Daftar 1, Daftar 3, dan Daftar 5.

1) Skema 1 : Pengaruh rasio jumlah limbah pewarnaan dan limbah pemucatan terhadap penurunan KOK.

Daftar 1 menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah limbah pemucatan menyebabkan penurunan nilai KOK semakin besar, dan waktu 70 menit adalah waktu yang cukup untuk mempelajari dinamika perubahan nilai KOK. Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh kecepatan penurunan KOK oleh

Daftar 2. Nilai Konstanta Laju Reaksi dengan Variasi Rasio antara Limbah pewarnaan dengan Limbah Pemucatan

Rasio (mL/mL)	150/0	112,5/37,5	100/50	75/75	50/100	37,5/112,5
$k (10^6), 1/\text{det}$	9,5	33,8	120,2	172,7	201,7	224,0



Gambar 2. Grafik Pengaruh Rasio Limbah (mL/mL) dan Waktu terhadap Konversi KOK

Daftar 3. Nilai KOK Limbah Pewarnaan pada Beberapa Penambahan H_2O_2

Waktu, menit	Volume HidrogenPeroksida (H_2O_2) 50%					
	0 mL	2 mL	4 mL	6 mL	8 mL	10 mL
0	8598	8377	8321	7426	8466	7426
10	8487	5664	5276	3911	3559	2505
25	8432	5387	4722	3383	3032	1274
45	8432	5165	4612	3252	3032	1274
70	8321	5110	4722	3032	2768	1054

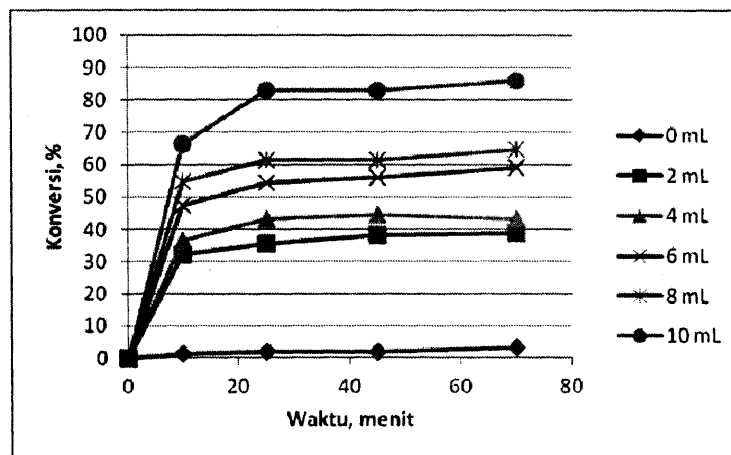
masih adanya H_2O_2 sisa di dalam limbah pemucatan. Di samping itu, pen-campuran kedua limbah tidak menyebabkan perubahan nilai KOK awal secara bermakna, yang berarti bahwa limbah pemucatan juga mengandung senyawa lain akibat aktivitas pemucatan bahan baku oleh H_2O_2 dengan nilai KOK sedikit lebih kecil dibandingkan dengan nilai KOK limbah pewarnaan. Gambar 2 menunjukkan peningkatan konversi KOK terhadap waktu untuk masing-masing rasio limbah pewarnaan dan limbah pemucatan, dan terdapat peningkatan penurunan COD dengan semakin kecilnya rasio limbah tersebut. Pada rasio 37,5/112,5 (mL/mL) diperoleh konversi mendekati 45%. Konversi KOK yang dicapai dengan memanfaatkan limbah pemucatan saja

nampaknya masih belum memadai. Dengan pendekatan reaksi order 1 semu terhadap KOK, nilai tetapan kecepatan reaksi untuk variasi tersebut ditunjukkan pada Daftar 2.

Berdasarkan pada pada Daftar 2 menunjukkan bahwa tetapan kecepatan reaksi untuk penambahan limbah pemucat lebih daripada 50 ml mempunyai nilai lebih besar daripada $10^{-4}/\text{det}$. Hal ini mengindikasikan keberadaan H_2O_2 dalam campuran limbah untuk penambahan tersebut lebih besar dari pada 10^{-12} mol/L (Glaze dan Kang, 1989).

2) Skema 2 : Penurunan KOK limbah pewarnaan akibat penambahan H_2O_2/UV

Daftar 3 dan Gambar 3 menunjukkan penurunan KOK dan konversi KOK oleh



Gambar 3. Konversi KOK terhadap Waktu pada Variasi Penambahan H₂O₂

Daftar 4. Nilai Konstanta Laju Reaksi dengan Variasi Penambahan H₂O₂

Volum H ₂ O ₂ , mL	0	2	4	6	8	10
k (10 ⁶), 1/det	9,5	750,2	886,53	1309,53	1560,48	2688,73

Daftar 5. Penurunan KOK (mg/L) Proses Oksidasi Lanjut Campuran Limbah Pewarnaan (75 mL) dan Limbah Pemucatan (75 mL) dengan Variasi Penambahan H₂O₂

Waktu, menit	Volume HidrogenPeroksida (H ₂ O ₂) 50%				
	0 mL	2 mL	4 mL	6mL	8 mL
0	8266	8126	8184	8184	8232
10	5608	5414	5299	5068	4850
25	5497	5183	4837	3568	2826
45	5442	4952	4491	3337	2601
70	5331	4779	4260	2875	2207

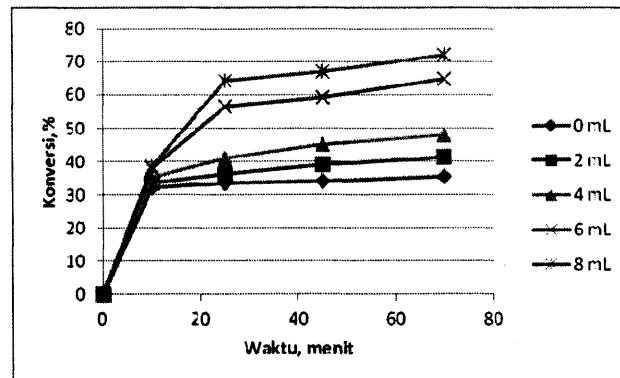
Daftar 6. Tetapan Laju Reaksi Proses Oksidasi Lanjut Campuran Limbah Pewarnaan dan Limbah Pemucatan (75/75 mL/mL) dengan Penambahan H₂O₂.

Volum H ₂ O ₂ , mL	0	2	4	6	8
k (10 ⁶), 1/det	172,667	196,667	230,667	336,00	397,33

penambahan H₂O₂ pada beberapa waktu proses. Adapun nilai tetapan kecepatan reaksi ditunjukkan pada Daftar 4.

Dari Daftar 3 dapat dinyatakan bahwa pengaruh jumlah penambahan H₂O₂ sampai 10 mL pada penurunan KOK masih sangat besar, dan dalam waktu 25 menit penurunan KOK sudah sangat kecil. Dalam waktu

kurang dari 45 menit, Gambar 2 menunjukkan bahwa untuk penambahan H₂O₂ 10 mL menghasilkan konversi KOK lebih dari 80%. Meskipun nilai KOK yang dicapai masih belum memenuhi baku mutu (sekitar 100 mg/L), tetapi nilai konversi tersebut sudah dipandang cukup tinggi.



Gambar 4. Pengaruh Penambahan H₂O₂ pada Peningkatan Konversi KOK Proses Oksidasi Lanjut Campuran Limbah Pewarnaan dan Limbah Pemucatan (75/75 mL/mL).

Daftar 4 memberikan fakta bahwa tetapan laju reaksi Skema 2 terletak di dalam kisaran nilai tersebut yang ditunjukkan oleh Glaze and Kang (1989), yaitu antara 1 dan 10⁻⁴/det, yang berarti bahwa reaksi bisa didekati dengan reaksi order 1 semu terhadap KOK. Jika dibandingkan, tetapan laju reaksi penambahan H₂O₂ terkecil pada Skema 2, sebesar 2 mL, masih lebih besar daripada tetapan laju reaksi rasio terbesar pada Skema 1.

3) Skema 3 : Kombinasi Skema 1 dan Skema 2

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari Skema 1 dan Skema 2, maka percobaan dengan Skema 3, yaitu kombinasi Skema 1 dan Skema 2, dilakukan. Percobaan ini diperlukan untuk memberi gambaran aplikasi proses oksidasi lanjut dengan memanfaatkan limbah yang mengandung H₂O₂. Pada skema ini, rasio limbah pewarnaan dan limbah pemucatan ditetapkan sebesar 75 mL/75 mL dengan mempertimbangkan jumlah masing-masing limbah dan keefektifan penurunan KOK sebagaimana ditunjukkan pada Skema 1, dan penambahan H₂O₂ bervariasi dari 2 sampai 8 mL. Data penurunan KOK dicantumkan pada Daftar 5.

Daftar 5 menunjukkan bahwa kecenderungan penurunan KOK terhadap penambahan H₂O₂ tetap konsisten sebagaimana yang ditunjukkan oleh Skema 1 dan

Skema 2, yaitu semakin banyak penambahan H₂O₂ menghasilkan penurunan KOK semakin cepat. Namun demikian jika dibandingkan dengan Skema 2, nampak bahwa dengan memanfaatkan limbah pemucatan dengan jumlah yang sama dengan limbah pewarnaan diperoleh penghematan H₂O₂ sekitar 2 mL.

Sebagaimana penurunan KOK, kecenderungan peningkatan konversi KOK dan tetapan kecepatan reaksi juga serupa dengan Skema 1 dan Skema 2, dengan nilai masing-masing terletak di antara ke dua skema tersebut. Hal ini ditunjukkan pada Daftar 6 dan Gambar 4.

Konversi tertinggi yang dicapai proses Skema 3 adalah lebih dari 70%, yang terjadi untuk penambahan H₂O₂ 8 mL. Nilai konversi ini besar kemungkinan sudah cukup untuk umpan pengolahan lebih lanjut, yaitu menggunakan cara biologi, karena proses tersebut menghasilkan senyawa-senyawa yang lebih mudah untuk terbiodegradasi (Marco dkk., 1997; Ledakowicz, 1998).

Keuntungan lain dari pemanfaatan limbah pemucatan sebagai reagen pada proses oksidasi lanjut limbah pewarnaan adalah menurunkan kadar polutan kedua limbah tersebut karena disamping menurunkan kadar KOK limbah pewarnaan, KOK limbah pemucatan juga mengecil.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

Limbah pemucat dapat dipakai untuk menurunkan KOK campuran limbah pewarnaan dan limbah pemucat, dengan kecenderungan semakin besar porsi limbah pemucat dalam campuran akan menghasilkan penurunan KOK semakin besar, dan konversi terbesar adalah 43,58%.

Dengan penambahan hidrogen peroksida yang sama, penurunan KOK campuran limbah pewarnaan dan limbah pemucatan lebih besar daripada penurunan KOK limbah pewarnaan tanpa limbah pemucatan.

Reaksi ke tiga skema dapat didekati dengan order 1 semu terhadap KOK

UCAPAN TERIMAKASIH.

Terimakasih disampaikan kepada PT Peroksida Indonesia Pratama, yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bendiyasa, I.M. Sarto, dan Kusumaningtyas, A., 2007, Oxidation of organic compounds with uv radiation and hydrogen peroxide : toluene in aqueous solutions, *Jurnal manusia dan lingkungan*, vol. 14, no 3, 142-150
- Bendiyasa, I.M. Sarto, Warasati, A., 2011, Reducing Chemical Oxygen Demand (COD) of Gamplong Textile Wastewater: Effect of Initial pH and the Mass Ratio of FeSO₄ to H₂O₂, 18th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE2011), 27th - 28th October 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam
- Chung, K. T., dan Cerniglia, C. E., 1992, "Mutagenicity of Azo Dyes: Structure-Activity Relationships". *Mutation Research*. 277, 201- 220
- Ghaly, M.Y., Hartel, G., Mayer, R. dan Haseneder, R., 2001, Photochemical Oxidation of p-Chlorophenol by UV/H₂O₂ and Photo-Fenton Process. A Comparative Study. *Waste Management*, 21, 41-47
- Glaze, W. dan Chapin, D., 1987, The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation, *Ozone Sci. & Eng.*, 9: 335-342.
- Glaze, W. dan Kang, J., 1989, Advanced oxidation processes. Test of a kinetic model for the oxidation of organic compounds with ozone and hydrogen peroxide in a semibatch reactor, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 28: 1580-1587.
- Glaze, W., Lay, Y., dan Kang, J., 1995, Advanced oxidation processes. A kinetic model for the oxidation of 1,2-dibromo-3-chloropropane in water by the combination of hydrogen peroxide and UV radiation, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34:2314-2323.
- Juang, L.C., 1997, Treatment of Petrochemical Wastewater by UV/H₂O₂ photodecomposed system. *Wat.Sci.Tech.* Vol. 36, 357-365.
- Juang, L.C., Tseng, D.W., dan Yang, S.C., 1997, Treatment of Petrochemical Wastewater by UV/H₂O₂ Photodecomposed System, *Wat.Sci.Tech.*, 36, 357-365.
- Kirk-Othmer, 1995, *Hydrogen peroxide*, Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Ed., Tokyo.
- Ledakowicz, S., 1998, Integrated processes of chemical and biological oxidation of wastewaters, *Environ. Protect. Eng.*, 24: 35-47.
- Marco, A., Esplugas, S. dan Saum, G., 1997, How and why to combine chemical and biological processes for wastewater treatment, *Water Sci. Technol.*, 35: 321-327.
- Mokrin, A dkk, 1997, Oxidation of aromatic compounds with UV Radiation/Ozone/Hydrogen peroxide. *Wat. Sci. Tech.* Vol.35, No. 4, 95-102.
- Munter, R., Preis, S., Kallas, J., Trapido, M. dan Veressinina, Y., 2001, Advanced oxidation processes (AOPs): Water treatment technology for the twenty-first century, *Kemia-Kemi*, 28: 354-362.
- Neppolian, B., Sakthivel, S., Arabindoo, B., Palanichamy, M. and Murugesan, V., 2001, Kinetics of photocatalytic degradation of reactive yellow 17 dye in aqueous solution using UV irradiation, *J*

- Environ. Sci. Health Part A. Tox Hazard Subst. Environ. Eng.*, 36: 203-213.
- Parra, S., Sarria, V., Malato, S., Peringer, P. dan Pulgarin, C. , 2000, Photochemical versus coupled photochemical-biological flow system for the treatment of two biorecalcitrant herbicides: metobromuron and isoproturon, *Appl. Catal. B:Environ.*, 27: 153-168.
- Sarria, V., Parra, S., Invernizzi, M., Péringer, P. dan Pulgarin, C. ,2001, Photochemicalbiological treatment of a real industrial biorecalcitrant wastewater containing 5-amino-6-methyl-2-benzimidazolone, *Water Sci. Technol.*, 44: 93-101.