

PENGOLAHAN AIR LIMBAH BERWARNA INDUSTRI TEKSTIL DENGAN PROSES AOPs

Oleh :

Rudi Nugroho dan Ikbal

Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Lingkungan, BPPT

Abstract

An experiment of advanced oxydation processes (AOPs) was applicated in textile wastewater treatment for color removal. The experiment was conducted in laboratory scale using ozon and hydrogen peroxide as oxidizing agents. The textile wastewater contains any organic and inorganic dyes that could not be effective treated by coagullation and and sedimentation as well as by conventional aerobic treatments. Result of the experiments concluded that the AOPs technologies could be applied effectively for removal of color. Addition of hydrogen peroxide with volume of 0.25 ml for 1 liter of wastewater exhibits the reaction. The reaction of AOPs for color removal was optimum at temperatur of 70°C. As higher as pH, the reaction become faster and the efficiency of color removal become higher.

Key words: advanced oxidation processes, color removal, hydrogen peroxide, ozon,

1. PENDAHULUAN

Indonesia dalam dasawarsa terakhir merupakan salah satu negara penghasil utama tekstil dan bahan sejenisnya setelah India dan Pakistan. Banyaknya industri-industri tekstil di Indonesia dalam satu sisi membawa peningkatan devisa, namun disisi lain menimbulkan masalah pencemaran lingkungan yang cukup besar. Keberadaan Industri tekstil di Indonesia tidak hanya dalam kategori industri skala besar dan menengah, tetapi juga dalam skala kecil dan bahkan ada yang dalam skala rumah tangga (home industry), seperti pewarnaan dan pencelupan jeans. Dengan demikian, pencemaran yang ditimbulkan oleh industri tersebut tidak hanya pada kawasan-kawasan industri, namun juga terjadi di perkampungan-perkampungan padat penduduk.

Air limbah yang dihasilkan oleh industri tekstil dan bahan sejenisnya disamping mengandung bahan pencemar organik yang umum dinyatakan dalam COD, BOD dan logam-logam berat, juga mengandung bahan pewarna organik rantai panjang yang relatif sukar diolah dengan proses biologis biasa. Secara umum, untuk mereduksi bahan pencemar organik yang mudah didegradasi, teknologi yang diterapkan adalah teknologi pengolahan air limbah secara biologis, seperti proses lumpur aktif, *aerated lagoon*, biofilter anaerob-aerob ataupun trickling filter. Sedangkan air limbah yang mengandung polutan bahan organik zat warna rantai panjang yang biasa digunakan pada indutsri tekstil seperti senyawa azo, antraquinon dan juga ftalosianin, tidak dapat dengan mudah diolah dengan proses biologis biasa. Untuk mengatasi kendala diatas

maka perlu dipikirkan ada perlakuan khusus untuk memecah rantai panjang zat warna sebelum air limbah diumpan kedalam bioreaktor biologis. Salah satu cara yang mudah diaplikasikan adalah proses oksidasi menggunakan oksidator kuat seperti ozon dan hidrogen peroksida, yang lebih dikenal dengan proses *Advance Oxidation Processes* (AOPs). Proses ini dulunya dikenal cukup mahal, tetapi perkembangan teknologi telah menjadikan proses ini bukan saja murah tetapi juga mudah untuk diaplikasikan.

Makalah ini memuat hasil penelitian dasar teknologi penghilangan warna pada air limbah industri tekstil dengan proses oksidasi AOPs skala laboratorium. Disini diteliti parameter-parameter yang mempengaruhi proses AOPs dan kondisi-kondisi yang paling baik untuk proses AOPs. Penelitian ini merupakan penelitian pendahuluan yang nantinya akan dilanjutkan pada penelitian skala yang lebih besar yaitu skala semi pilot.

2. TINJAUAN TEORI

2.1 Jenis-jenis Zat Pewarna Tekstil

Zat pewarna tekstil, kebanyakan menggunakan senyawa organik rantai panjang. Berdasarkan struktur kimianya zat pewarna tekstil dibedakan menjadi beberapa jenis seperti pada Tabel 1.

Produksi zat pewarna baik dalam skala internasional maupun didalam negeri menunjukkan angka peningkatan dari tahun ketahun. Hal ini disebabkan karena permintaan bahan tersebut yang meningkat seiring dengan

laju pertumbuhan industri tekstil dan industri lain yang memerlukan pewarnaan. Sebagian zat pewarna yang telah digunakan untuk proses di industri, akan terbuang menjadi polutan bersama air limbah dan penanganan khusus sesuai sifat-sifatnya.

Tabel 1. Klasifikasi zat pewarna berdasarkan struktur kimia.

Nama Zat Warna	Keterangan
<i>Azo</i>	Mengandung gugus azo -N=N-
<i>Anthraquinones</i>	Mengandung gugus amino dan hidroksi
<i>Ftalosianin</i>	Banyak dipakai untuk tinta cetak
<i>Indigoid</i>	Mengandung gugus karbonil
<i>Benzodifuranones</i>	Sintesa lanjut dari asam arilasetat dan hydroquinone
<i>Oxazines</i>	
<i>Polimetin</i>	
<i>Di dan Tri-aril karbonium</i>	Memiliki warna yang cerah dan kuat namun mudah luntur
<i>Karbonil Aromatik Polisiklik</i>	
<i>Quinophtalones</i>	
<i>Sulfur</i>	Gugus sulfur sebagai jembatan penghubung
<i>Nitro dan nitroso</i>	Turunan dari o-nitrofenol atau naftol

Pada awal abad ke 20, sekitar 85% kebutuhan zat pewarna dunia dipenuhi oleh Jerman dan sekitar 10% oleh negara-negara Eropa lainnya. Perkembangan selama 70 tahun kemudian, pasca perang dunia, angka-angka ini berubah cukup drastis seperti terlihat pada Tabel 2.

Di Indonesia, perkembangan produksi zat pewarna dapat diketahui data-data ekspor nasional. Berdasarkan data yang diambil dari Biro Pusat Statistik tahun 2000, perkembangan ekspor zat pewarna meningkat 44,9% dari tahun 1996 sampai tahun 2000. Ini mencerminkan meningkatnya kebutuhan zat pewarna baik untuk keperluan proses produksi pada industri seperti tekstil maupun pada industri lain yang memerlukannya.

Tingginya pemakaian zat pewarna pada kegiatan industri tentu membawa dampak pada peningkatan jumlah bahan pencemar dalam limbah cair yang dihasilkan.

2.2 Teknologi Pengolahan Limbah Cair Zat Pewarna

Menurut Degreemont, ada beberapa alternatif teknologi yang dapat digunakan untuk mengolah limbah cair yang mengandung zat pewarna. Teknologi tersebut meliputi netralisasi, koagulasi - flokulasi, adsorpsi dan oksidasi menggunakan oksidator kuat (AOPs). Selanjutnya sepintas akan dibahas satu persatu proses penghilangan warna tersebut diatas.

2.2.1 Netralisasi

Secara umum proses netralisasi digunakan untuk menetralkan limbah cair yang bersifat terlalu asam atau basa. Namun pada beberapa jenis air limbah yang mengandung zat pewarna, dengan proses netralisasi warna sudah dapat dikurangi bahkan dapat hilang sama sekali. Bahan kimia untuk menetralkan pH dipilih dengan mempertimbangkan harga, kemudahan dalam memperolehnya dan keamanan dalam penyimpanannya disamping tingkat keefektifannya. Bahan kimia penetral yang sering digunakan adalah natrium hidroksida, natrium karbonat, kalsium hidroksida hidrat, asam sulfat, asam klorida dan karbon dioksida.

2.2.2 Koagulasi dan Flokulasi

Proses koagulasi dan flokulasi juga dapat digunakan untuk menghilangkan warna. Pada proses koagulasi dan flokulasi, padatan termasuk juga zat pewarna akan saling menempel dan membentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar dan berat (flok). Flok selanjutnya dapat dipisahkan melalui filtrasi, pengendapan dan pengapungan. Koagulasi terjadi akibat penurunan potensial zeta pada permukaan partikel sehingga dapat bergabung untuk membentuk partikel yang lebih besar. Proses koagulasi sangat bergantung pada pH operasi dan konsentrasi koagulan yang digunakan. Koagulan yang sering digunakan adalah lime, kalsium sulfat, kalsium hidroksida, magnesium hidroksida, magnesium sulfat, ferri klorida, feri dan fero sulfat dan kombinasi garam-garamnya.

2.2.3 Adsorpsi

Adsorpsi adalah penyerapan partikel-partikel halus oleh bahan adsorben. Pada proses ini warna yang ada dalam air limbah juga akan ikut terserap. Proses penghilangan warna dengan karbon aktif saat ini banyak digunakan terutama untuk zat warna anorganik dengan konsentrasi rendah. Kelemahan dari proses ini diantaranya adalah hanya memindahkan polutan zat warna dari air limbah ke permukaan karbon

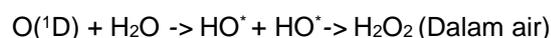
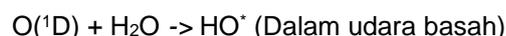
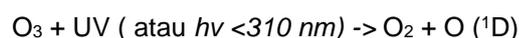
aktif. Pada fase tertentu, karbon aktif akan mengalami kejenuhan dan harus dilakukan pencucian. Air hasil cucian karbon aktif ini pada akhirnya akan bermasalah karena berpotensi menjadi air limbah lagi.

Penghilangan warna dengan proses flokulasi-koagulasi dan adsorpsi sifatnya hanya memindahkan zat warna khususnya dari fase cair ke dalam fase padat, bukan menguraikan senyawa-senyawa kompleks pembentuk warna. Dengan demikian, partikel-partikel warna yang mengumpul bersama bahan koagulan-flokulan atau yang menempel pada bahan adsorben perlu diproses lebih lanjut sehingga tidak menimbulkan pencemaran lanjutan.

2.2.4 Advanced Oxidation Process (AOPs)

Advanced Oxidation Processes (AOPs) didefinisikan oleh Glaze et al. (1987) dan Gottschalk, et al. (2000) sebagai proses yang melibatkan pembentukan radikal aktif hidroksil (HO^*) dalam jumlah yang cukup untuk proses penguraian air limbah dengan menggunakan oksidator kuat. Oksidator kuat yang dipakai dapat berupa campuran ozon dengan hydrogen peroksida ($\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$), ozon dengan sinar ultra violet ($\text{O}_3 + \text{UV}$), dan campuran hydrogen peroksida dengan sinar ultra violet ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{UV}$). Radikal aktif hidroksil yang dilepaskan senyawa-senyawa diatas dengan cepat akan mengoksidasi polutan-polutan zat warna dalam air limbah.

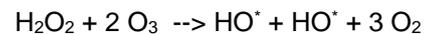
Produksi radikal aktif dengan sinar ultraviolet (UV) dapat diilustrasikan sebagai reaksi fotolisis ozon (Glaze et al., 1987, Glaze dan Kang, 1990 dalam Metcalf dan Eddy, 2003) seperti berikut;



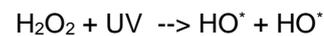
Peruraian ozon karena sinar matahari (fotolisis) dalam udara yang basah akan menghasilkan radikal aktif hidroksil. Dalam air, fotolisis ozon lebih cenderung membentuk hydrogen peroksida (H_2O_2). Proses fotolisis ozon akan menjadi lebih efektif jika senyawa yang akan didegradasi mempunyai penyerapan yang baik terhadap sinar UV.

Untuk senyawa-senyawa yang tidak dapat menyerap sinar UV, proses AOPs lebih efektif jika menggunakan campuran O_3 dan H_2O_2 . Bahan kimia dalam air limbah seperti trikloroetilen (TCE) dan perkloroetilen (PCE) dapat terurai secara signifikan menggunakan AOPs dengan oksidator H_2O_2 dan O_3 sebagai penghasil radikal aktif (Karimi et al., 1997).

Reaksi untuk memproduksi radikal aktif hidroksil menggunakan hydrogen peroksida dan ozon adalah sebagai berikut :



Radikal aktif hidroksil juga terbentuk pada saat air yang mengandung hydrogen peroksida terkena sinar UV (200 – 280 nm). Adapun reaksinya adalah sebagai berikut :



Saat ini, sistem pengolahan air limbah AOPs dengan ozon (ozonasi) dalam skala besar telah diaplikasikan untuk mengolah air lindi (leached) di tempat pembuangan akhir sampah (TPA), air limbah berwarna pada industri tekstil, air limbah industri farmasi (Figwa, 1997; Bohme, 1999, Gottschalk, et al., 2000). Polutan utama dalam air limbah industri-industri tersebut adalah senyawa organik yang sulit diuraikan, meliputi :

- Komponen humus yang warna coklat atau warna kuning dan *adsorbable organic halogens* (AOX) pada air lindi di TPA.
- Komponen aromatik (poliaromatik) berwarna yang sering berikatan dengan sejumlah ion logam (Cu, Ni, Zn, Cr) pada limbah cair tekstil.
- Substansi toksik (biocidal) pada industri farmasi dan kimia seperti pestisida.
- *Surfactant* (surface aktive agents) dari limbah kosmetik dan lain sebagainya.
- COD pada komponen zat warna seperti pada tekstil, pulp.

Permasalahan yang sering muncul pada pengolahan air limbah dengan proses ozonasi adalah timbulnya busa, terbentuknya endapan kalsium oksalat, kalsium karbonat dan feri hidroksida yang mudah menyumbat aliran cairan dalam reaktor, perpipaan, katup dan pompa. Disamping itu kendala lain penggunaan ozon sebagai oksidator adalah biaya operasional pengadaan listrik yang cukup mahal. Sedangkan keuntungan dari penggunaan ozon dibanding oksidator maupun desinfektan lain adalah tidak menghasilkan hasil samping senyawa organik halogen seperti dioksin.

2.2.5 Teknologi Pembangkitan Ozon

Ozon adalah molekul yang terdiri dari 3 atom oksigen, ditemukan oleh Van Marum pada tahun 1785 dengan menggunakan peralatan listrik. Ozon mempunyai berat molekul 48 g per mol, tidak berwarna pada temperatur kamar, dan

berupa cairan biru tua pada keadaan tekanan tinggi. (Bicknell & Jain, 2002.3:55-56).

Pembuatan ozon dapat dilakukan dengan cara memecah molekul oksigen menjadi atom oksigen dan selanjutnya atom oksigen berikatan dengan molekul oksigen lain membentuk gas ozon.

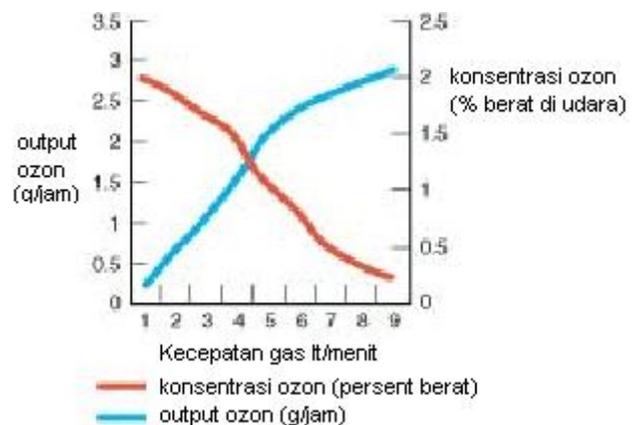
Ada beberapa cara yang digunakan untuk membangkitkan ozon, seperti terlihat pada Tabel 5. Metode *electrical discharge* dan elektrolisis merupakan cara yang paling sering digunakan, baik pada skala laboratorium maupun skala industri. *Electrical discharge* disebut juga *silent discharge ozon generators* yang mengionisasi molekul ozon dengan memakai arus bolak balik tegangan tinggi ke udara. Udara atau oksigen murni pada tekanan ambien maupun tekanan tinggi (100 – 600 kPa) dapat dipergunakan sebagai gas bahan baku pembuat ozon. Pada proses ini, energi yang disuplai hanya 4 – 12% digunakan untuk membangkitkan ozon, sedangkan sisanya keluar sebagai panas (Ozonek et.al, 2000). Penambahan unit pendingin pada alat pembangkit ozon dapat membantu meningkatkan efisiensi pembentukan ozon (Astex, 1997) Teknologi lain pembuatan ozon yang juga banyak digunakan adalah *Plasma Corona Discharge*, menggunakan listrik tegangan tinggi dengan arus rendah yang memancar melintang diantara plasma. Ketika oksigen melewati arus listrik, beberapa molekul akan terpecah dan menghasilkan atom oksigen bebas yang dengan cepat akan menempel pada molekul oksigen yang masih ada membentuk molekul O₃ yang memiliki kemampuan oksidasi besar.

Biasanya, konsentrasi ozon yang keluar dari pembangkit ozon dinyatakan dalam satuan masa atau berat ozon yang dihasilkan pada waktu tertentu. Satuan yang biasa dipakai adalah lbs/day, gr/jam, mg/jam. Sedangkan pengertian dari konsentrasi ozon adalah jumlah ozon yang terukur dalam bentuk gas yang persentasenya berdasarkan berat atau volume dengan satuan mg/L, atau g/m³.

Supaya penggunaan udara atau gas oksigen untuk pembangkitan ozon dapat optimal maka oksigen harus memiliki waktu yang cukup lama berada pada medan listrik sehingga akan semakin besar pula persentase molekul ozon yang terbentuk. Penentuan laju alir gas yang optimal diperlukan untuk memastikan proses pembentukan ozon tidak terganggu oleh panas yang dihasilkan oleh pembangkit ozon. Apabila ozon yang terbentuk mengalir terlalu lambat melewati medan listrik, maka ozon tersebut akan terkena panas dari medan listrik yang mengakibatkan rusaknya molekul ozon. Tetapi apabila molekul ozon terbentuk yang bercampur dengan gas umpam tidak cukup waktu berada

pada medan listrik, maka kinerja pembentukan gas ozonpun tidak akan optimal. Laju alir gas yang optimal akan ditentukan oleh titik persilangan hubungan antara jumlah gas output dengan konsentrasi ozon seperti terlihat pada gambar 1

Semakin besar konsentrasi ozon maka prosentase ozon yang larut di dalam air juga akan semakin besar, dan hal ini akan meningkatkan kemampuan oksidasi. Disamping itu tingkat kelarutan ozon juga dipengaruhi oleh suhu, seperti terlihat pada Tabel 6.



Gambar 1 : Hubungan antara laju alir gas dan konsentrasi ozon pada outlet pembangkit ozon

Tabel 6. Tingkat kelarutan ozon pada beberapa konsentrasi dan temperatur

O ₃ GAS	5° C	10° C	15° C	20° C
1.5%	11.09	9.75	8.40	6.43
2%	14.79	13.00	11.19	8.57
3%	22.18	19.50	16.79	12.86

3. PROSEDUR PENELITIAN

3.1 Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian AOPs untuk mengolah air limbah yang mengandung zat pewarna tekstil dilakukan di Laboratorium Balai Besar Kimia dan Kemasan, Depertemen Perindustrian, Pasar Rebo, Jakarta Timur. Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Juli sampai dengan bulan Desember 2004.

3.2 Air limbah dan Bahan Kimia

Air limbah yang digunakan untuk penelitian adalah air limbah yang dari instalasi pretreatment air limbah industri tekstil (batik) di kawasan industri Jababeka, Cikarang. Air limbah ini berwarna merah tua yang disebabkan bahan pewarna non organik maupun organik . Selama ini air limbah tersebut diolah dengan proses biologi aerobik setelah proses pengendapan. Kendala, meskipun telah diolah, namun warna air olahan hampir tidak berubah, sehingga dapat mengganggu kualitas air olahan secara keseluruhan. Untuk keperluan penelitian, air limbah ini diambil secara periodik dan dibawa ke laboratorium. Tabel 8 menunjukkan tanggal pengambilan sampel dan karakteristik air limbah yang akan diolah.

Bahan kimia yang digunakan untuk penelitian AOPs diantaranya adalah udara dan gas oksigen sebagai sumber ozon, senyawa hidrogen peroksida teknis konsentrasi 50%, koagulan dan flokulan (PAC, FeCl₃, Tawas, Aqua 2000), HCl dan NaOH untuk pengatur pH.

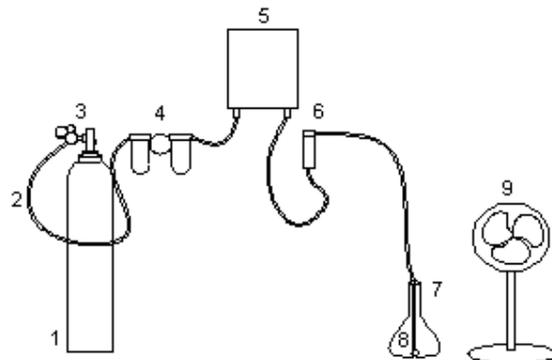
3.3 Peralatan dan Jalannya Penelitian

Skema peralatan yang digunakan untuk menghilangkan warna air limbah industri tekstil pada penelitian ini adalah seperti pada Gambar 2. Gelas ukur dan gelas Erlenmeyer digunakan sebagai wadah tempat proses oksidasi.

Tabel 8. Karakteristik air limbah industri tekstil untuk penelitian AOPs

Tanggal Sampling	Karakteristik Air Limbah
27-09- 2004	Warna merah tua Konsentrasi 3370PtCo
15-09-2004	Warna merah tua Konsentrasi 3100PtCo pH 7,79 COD 400 mg/l
27-09-2004	Warna merah tua Konsentrasi 5640 PtCo pH 8,07 COD 610 mg/l
1- 09-2004	Warna merah tua Konsentrasi 5610PtCo pH 8,37 COD 420 mg/l
24-09-2004	Warna merah tua Konsentrasi 3740PtCo pH 8,01 COD 950 mg/l
1- Desember 2004	Warna merah tua Konsentrasi 2390PtCo pH 7,47 COD 450 mg/l

Kedalam kedua wadah ini air limbah berwarna dimasukkan dalam volume tertentu, kemudian selama waktu yang ditetapkan dialirkan gas ozon dari generator pembangkit ozon. Ozon diproduksi dari oksigen yang dialirkan ke dalam ozon generator. Sebagai sumber ozon, digunakan oksigen dari udara bebas dan oksigen murni dari tabung gas oksigen. Pada saat menggunakan oksigen dari udara, udara disuplai dari kompresor ke pembangkit ozon. Sedangkan saat memproduksi ozon dari oksigen murni, oksigen langsung dialirkan dari tabung kedalam generator ozon. Laju alir oksigen diatur dengan flow meter yang dilengkapi katup pengatur aliran. Laju alir oksigen ataupun udara masuk ke dalam pembangkit ozon diatur 3 ml/menit. Sebelum oksigen masuk kedalam generator ozon, terlebih dulu dikeringkan melalui filter yang berisi gel silica. Ozon yang terbentuk dari ozon generator (Ozotech, Amerika) selanjutnya dialirkan melalui difuser kedalam air limbah yang telah ditempatkan dalam gelas Erlenmeyer atau gelas beker. Untuk melihat pengaruh penambahan oksidator hydrogen peroksida, kedalam air limbah ditambahkan larutan H₂O₂ berkonsentrasi 50% sebelum diozonasi. Melihat pengaruh suhu dilakukan dengan cara memanaskan air limbah, sedangkan pengaturan pH dilakukan dengan larutan asam khlorida.



Gambar 2 : Rangkaian alat penelitian AOPs skala laboratorium

Parameter yang dianalisa selama penelitian berlangsung adalah pH, konsentrasi warna dan konsentrasi chemical oksigen demand (COD).

3.4 Tahapan Penelitian

Tahapan atau lingkup pekerjaan yang dilakukan pada penelitian ini adalah untuk:

- 1) Mengetahui pengaruh proses koagulasi terhadap penurunan warna air limbah.

- 2) Melihat pengaruh sumber oksigen penghasil ozon terhadap konsentrasi ozon yang dihasilkan.
- 3) Melihat pengaruh laju alir oksigen terhadap konsentrasi ozon yang dihasilkan.
- 4) Mengetahui pengaruh perubahan suhu terhadap efektifitas proses AOPs.
- 5) Mengetahui pengaruh penambahan hidrogen peroksida dan pemanasan terhadap proses AOPs.
- 6) Mengetahui pengaruh derajat keasaman air limbah (pH) terhadap proses AOPs.

4. HASIL PENELITIAN

4.1 Proses Koagulasi dan Sedimentasi

Sebelum dilakukan proses AOPs, terlebih dulu air limbah berwarna ini diolah dengan proses koagulasi dan flokulasi menggunakan koagulan FeCl_3 , PAC dan Aqua 2000. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui apakah penambahan bahan koagulan dan flokulan dapat menurunkan warna air limbah atau setidaknya apakah dapat digunakan sebagai alternatif pre-treatment pada

Tabel 9. Pengaruh penambahan bahan koagulan terhadap warna air limbah tekstil.

Jenis Koagulan	Konsentrasi koagulan (ppm)	Konsentrasi warna PtCo (mg/L)	Penurunan warna (%)
Tanpa koagulan	-	5925	-
FeCl_3	1200	5100	14
Aqua2000	1200	5565	6
PAC	1200	4980	6

proses AOPs. Tabel 9 adalah perubahan warna yang terjadi pada air limbah setelah penambahan beberapa jenis bahan koagulasi.

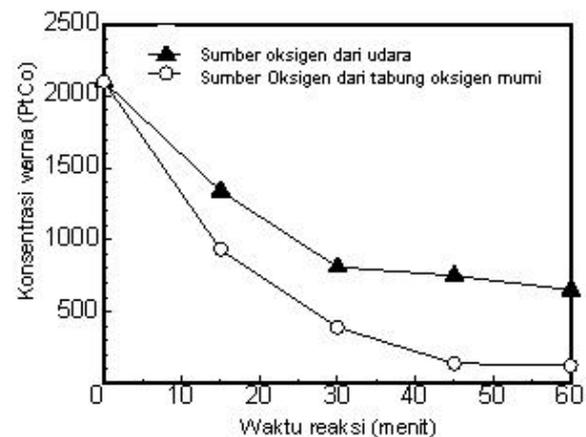
Dari sini terlihat, penambahan bahan kimia koagulan FeCl_3 , Aqua2000 maupun PAC sampai dosis 1200 mg/L hanya mampu mendegradasi warna beberapa proses saja, angka tertinggi yaitu 14% dengan penambahan senyawa FeCl_3 . Dengan demikian meskipun proses koagulasi ditempatkan sebagai pre-treatment sebelum proses AOPs tidaklah efektif, karena kemampuannya dalam mereduksi warna kecil sekali. Disamping itu, penambahan bahan kimia koagulan akan menaikkan biaya operasional dan

akan menghasilkan sludge yang memerlukan penanganan khusus.

4.2.1 Pengaruh Sumber Oksigen Terhadap Produksi Ozon

Sebagaimana diuraikan diatas, sumber ozon digunakan oksigen dari udara bebas dan gas oksigen murni dari tabung gas oksigen. Disini dilihat jumlah ozon yang mampu dihasilkan generator pembangkit ozon dari masing-masing sumber tersebut dan indikasi yang digunakan adalah pengurangan warna yang terjadi pada air limbah yang diteliti. Proses ozonasi dilakukan pada laju alir gas 3 liter permenit dan pengukuran perubahan warna dilakukan setiap interval waktu 15 menit.

Gambar 3 menunjukkan penurunan warna air limbah yang terjadi pada proses ozonasi dengan sumber oksigen dari udara dan dari oksigen murni dari tabung gas.

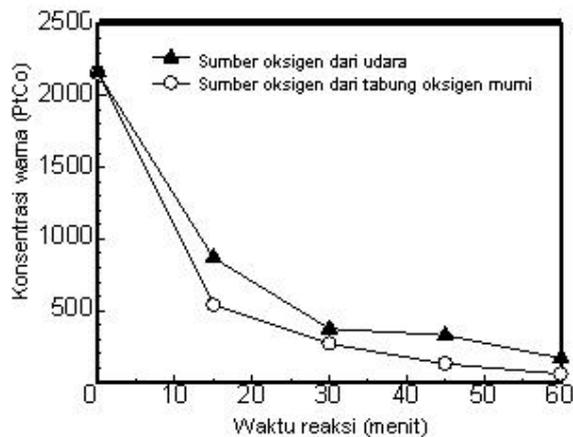


Gambar 3 : Pengaruh sumber gas pembangkit ozon terhadap penurunan warna air limbah tekstil .

Dari gambar 3 terlihat, ozon yang dihasilkan dari oksigen murni mampu mereduksi warna sampai 50% hanya dalam waktu 15 menit, dan warna air limbah hampir hilang setelah proses ozonasi berlangsung 45 menit. Sebaliknya proses ozonasi dari ozon yang bersumber dari oksigen udara, diperlukan waktu sekitar 30 menit untuk mendegradasi warna sebanyak 50%, setelah itu hampir tidak terjadi pengurangan warna meskipun proses ozonasi terus dilakukan selama 60 menit. Perbedaan ini disebabkan karena jumlah ozon yang dihasilkan dari oksigen murni lebih banyak dibanding dengan jumlah ozon dari oksigen udara atau dengan kata lain, efisiensi ozon generator lebih

tinggi bila menggunakan oksigen murni. Tingginya konsentrasi ozon ini menyebabkan kemampuan oksidator juga semakin kuat, sehingga proses degradasi warna juga makin cepat berlangsung. Hal ini yang terjadi pada proses ozonasi dengan ozon dari sumber oksigen murni.

Dari data pada spesifikasi alat ozon generator, disebutkan apabila sumber gas pembangkit ozon menggunakan oksigen murni, maka kapasitas ozon yang dihasilkan akan menjadi dua kali lipat lebih besar dibandingkan apabila menggunakan sumber gas udara. Dengan demikian dari data penelitian pada gambar 3 diatas dapat disimpulkan bahwa kecepatan penurunan warna akan menjadi dua kali lebih cepat apabila ozon yang digunakan kapasitasnya dua kali lipat lebih besar.



Gambar 4. Pengaruh penambahan senyawa peroksida terhadap penurunan warna air limbah tekstil

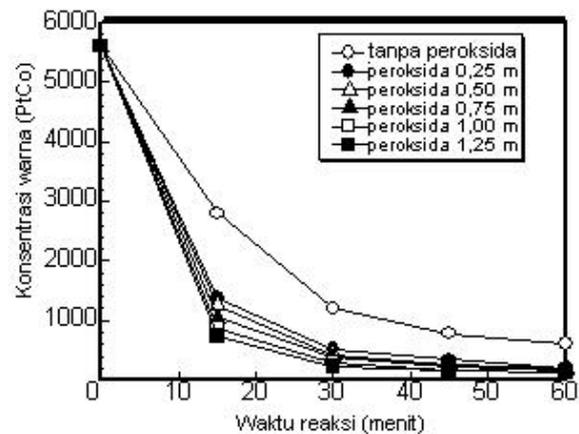
4.2.2 Pengaruh Penambahan Oksidator Hidrogen Peroksida

Selanjutnya dilihat pengaruh penambahan senyawa hidrogen peroksida terhadap proses degradasi warna. Penambahan senyawa hydrogen peroksida sebanyak 0,25 ml per liter air limbah dilakukan pada proses ozonasi dengan sumber oksigen masing-masing dari udara dan dari oksigen murni. Hasilnya adalah seperti terlihat pada Gambar 4. Penurunan warna berlangsung sangat cepat, setelah 30 menit, baik dari oksigen udara maupun oksigen murni mencapai lebih dari 80%.

Setelah 1 jam, hampir tidak ada warna yang tersisa didalam air limbah. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penambahan hidrogen peroksida yang juga bersifat oksidator kuat pada proses ozonasi dapat mempercepat proses degradasi warna tekstil. Dari sini juga diketahui

bahwa konsentrasi ozon hampir tidak mempengaruhi efektifitas oksidator hidrogen peroksida. Ini terbukti dari kecepatan penurunan warna hampir tidak berbeda dengan sumber ozon baik dari oksigen murni maupun oksigen udara setelah penambahan senyawa hidrogen pereoksida.

Untuk mengetahui jumlah kebutuhan optimum hidrogen peroksida dalam mendegradasi zat warna tekstil, maka pada penelitian selanjutnya dilakukan penambahan hidrogen peroksida sampai jumlah 1,25 ml per liter air limbah dengan interval penambahan 0,25 ml. Sama seperti penelitian sebelumnya, proses ozonasi juga dilakukan selama 1 jam dan



Gambar 5. Pengaruh jumlah penambahan hidrogen peroksida terhadap penurunan warna air limbah tekstil

pengambilan sample untuk pengukuran warna dilakukan setiap interval waktu 15 menit

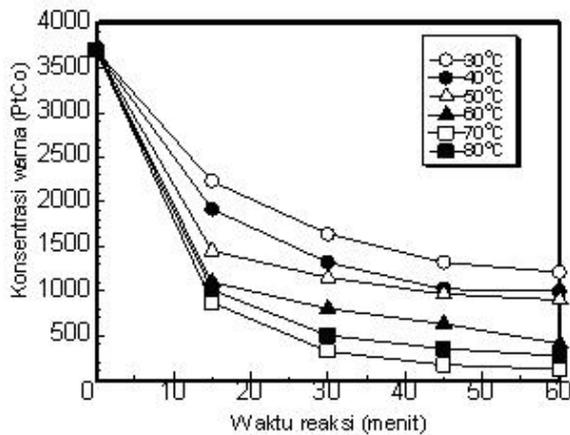
Hasil dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5. Dari gambar 5 diketahui bahwa meskipun penambahan hidrogen peroksida mempercepat degradasi warna, tetapi peningkatan jumlah penambahan hidrogen peroksida dari 0,25 ml sampai 1,25 ml tidak mempengaruhi kecepatan penurunan warna secara signifikan. Dari hasil ini ditetapkan bahwa untuk penelitian selanjutnya penambahan hidrogen peroksida cukup hanya 0,25 ml untuk 1 liter air limbah.

4.2.3 Pengaruh Suhu

Air limbah yang baru keluar dari industri tekstil kebanyakan masih bersuhu cukup tinggi sekitar 70–80°C. Suhu tinggi ini juga merupakan satu kendala pada industri tekstil karena air limbah ini harus didinginkan terlebih dulu pada *cooling tower* sebelum diolah lebih lanjut. Dengan melihat kondisi lapangan ini, maka pada penelitian juga diteliti pengaruh suhu terhadap efektifitas proses AOPs. Penelitian dilakukan

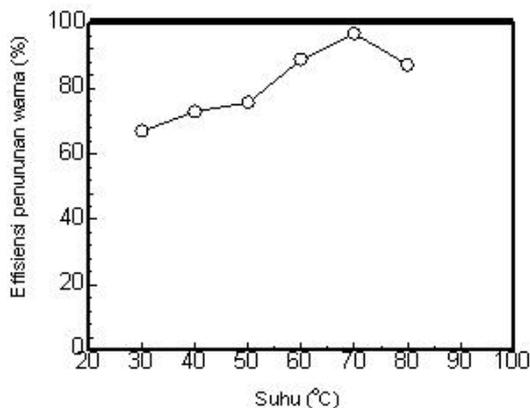
pada beberapa suhu yaitu 30, 40, 50, 60, 70 dan 80°C, dengan penambahan hidrogen peroksida. sebesar 0,25 ml untuk setiap 1 liter air limbah.

Gambar 6 menunjukkan tingkat pengurangan warna tiap-tiap satuan waktu pengamatan. Disini terlihat bahwa kenaikan suhu sampai 70°C dapat mempercepat reaksi penurunan warna. Tetapi apa bila suhu dinaikkan lagi sampai 80°C, efisiensi pengurangan warna cenderung menurun.



Gambar 6 : Pengaruh suhu terhadap penurunan warna pada proses AOPs.

Gambar 7 adalah rangkuman hasil perhitungan efisiensi pengurangan warna setelah 45 menit proses AOPs. Pada suhu 70°C terlihat efisiensi paling tinggi, yakni sekitar 98%.



Gambar 7 : Rangkuman efisiensi pengurangan warna pada masing-masing suhu yang diteliti.

Secara teoritis, kelarutan ozon dalam air semakin rendah dengan kenaikan suhu. Akan tetapi, untuk reaksi kimia seperti yang terjadi pada reaksi peruraian warna dengan ozon, kenaikan suhu setiap 10°C akan mempercepat kecepatan reaksi 2 kali lipat (Octave Levenspiel, 1972). Dengan demikian ada suatu suhu

optimum dimana kelarutan ozon dan kecepatan reaksi penguraian tinggi. Dari hasil penelitian ini, suhu optimum tersebut adalah 70°C.

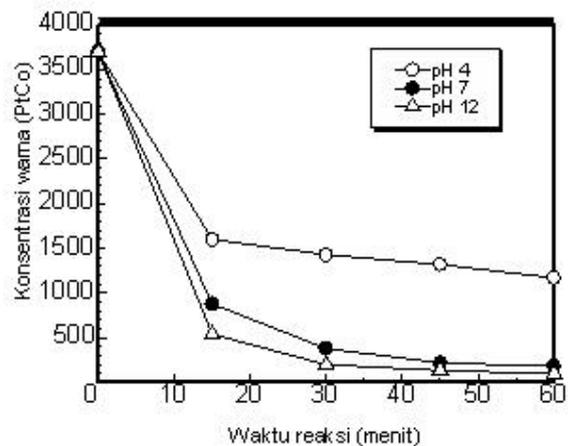
4.3 Pengaruh pH

Umumnya air limbah yang keluar dari industri tekstil memiliki pH bersifat basa, yaitu diatas 8. pH tinggi ini apakah akan berpengaruh terhadap proses AOPs, maka perlu dilakukan penelitian pengaruh pH terhadap efektifitas proses AOPs. Penelitian dilakukan pada 3 buah nilai pH, yaitu bersifat asam pada pH 4, bersifat netral pada pH 7 dan bersifat basa pada pH 12. pH air limbah diturunkan dengan larutan asam sulfat dan dinaikkan dengan larutan natrium hidroksida. Penelitian ini dilakukan pada kondisi penambahan hydrogen peroksida sebanyak 0,25 ml per liter air limbah dan suhu 70°C.

Gambar 9 adalah pengaruh pH terhadap penurunan warna air limbah. Pada kondisi pH manapun penurunan warna sangat cepat terjadi pada 15 menit pertama, setelah itu penurunan warna hanya terjadi sedikit sekali secara perlahan. Hal ini kemungkinan disebabkan karena pembentukan hidroksil HO* dari peroksida paling banyak terjadi pada lima belas menit pertama.

Dari gambar 9 terlihat, air limbah pada suasana basa (pH 12) mengalami degradasi warna paling cepat sekitar 97%, diikuti pada pH 7 dan terakhir pH 4 atau suasana asam yaitu 68%.

Dari hasil ini diketahui, oksidator akan bekerja lebih efektif pada kondisi basa atau pH tinggi. Pada penelitian pengaruh pH ini, efisiensi penurunan COD juga dihitung. Efisiensi penurunan COD pada pH 12 adalah sebesar 54%, sedangkan pada pH 4 hanya 36%.



Gambar 9 Pengaruh pH terhadap penurunan konsentrasi zat pewarna dalam air limbah pada proses AOPs.

5. KESIMPULAN

Teknologi AOPs menggunakan ozon dan hidrogen peroksida sebagai oksidator dapat digunakan dengan sangat efektif untuk menghilangkan warna pada air limbah industri tekstil. Berdasarkan pada hasil penelitian skala laboratorium yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

- Konsentrasi ozon sangat mempengaruhi kecepatan reaksi oksidator. Semakin tinggi konsentrasi ozon yang digunakan, maka reaksi penghilangan warna dengan AOPs akan semakin cepat.
- Hidrogen peroksida berfungsi sangat efektif sebagai oksidator. Penambahan hidrogen peroksida 0,25 ml untuk setiap 1 liter air limbah dapat mempercepat proses reaksi AOPs untuk menghilangkan warna.
- Suhu sangat mempengaruhi reaksi oksidasi. Suhu optimum pada proses AOPs adalah 70°C. Kondisi ini sangat menguntungkan karena kebanyakan air limbah yang keluar dari industri tekstil bersuhu 70~80°C.
- pH air limbah berpengaruh pada reaksi oksidasi. Reaksi AOPs akan berjalan dengan cepat pada suasana basa, yaitu pH 12.

DAFTAR PUSTAKA

1. Degreemont (1991), "Water Treatment Handbook, sixth edition.
2. Gottschalk, C., Libra, J. A., Saupe, A., 2000, "Ozonation of Water and Wastewater. A Practical Guide to Understanding Ozone and Its Application. Weinheim, German. Willey-Vch Verlag Gmbh.
3. Langlais, B., D.A. Rechkov, D.R. Brink, 1991, "Ozon in Water Treatment, Application in Engineering", Lewis Publisher and AWWA Research Foundation, USA.
4. EPA, 1999 "Wastewater Technology Fact Sheet Ozon Desinfection", United States Environmental Protection Agency, Washington DC.
5. Mc.Calf and Eddy, 1978 "Wastewater Engineering", Mc Graw Hill.
6. Perkowski, J., Stainslaw L., 2002, "Decomposition of Anthraquinone Dye in the Aqueous Solution by Ozon, Hydrogen Peroxide or UV", Dept of Bioprocess Engineering, Institute of Radiation Chemistry, Poland.
7. Namboodri, C.G., W.W. Perkins, W.K. Walsh, 1994 "Decolorizing Dyes With Chlorine And Ozon Part II", Text. Engr. Dept., Auburn Univ., Auburn, Alabama.
8. Karimi, A.A., J.A. Redman, W.H. Glaze, 1997, "Technology Overview", Journal AWWA.
9. Kementerian Lingkungan Hidup dengan ITB, 2003 "Studi Penyusunan Baku Mutu Air Limbah Untuk Kegiatan Industri Dyestuff (Zat Warna) dan Industri Copper Smelter, .
10. Octave Levenspiel, 1972 "Chemical Reaction Engineering, John Willey and Sons, Inc. 2nd. ed.

Tabel 2 : Produksi Zat Pewarna Dunia (dalam ribu ton)

Tahun	Eropa Barat	Amerika Serikat	Eurasia	Jepang	Lain-lain	Total
1938	110	37	35	-	28	210
1948	-	110	-	-	-	-
1958	112	80	127	-	27	346
1966	191	130	-	49	-	-
1974	300	138	200	68	44	750
1990	350	150	250	90	75	915

Sumber : Kirk Othmer (1997)

Tabel 5 : Tipe dari ozone generation, prinsip kerjanya dan penerapannya di lapangan

Cara Pembangkit Ozon	Prinsip Kerja	Sumber Ozon	Penerapan di Lapangan
Electrical	Electrical discharge (ED)	Udara atau O ₂	Standar biasa dari laboratorium ke skala penuh.
Elektrokimia	Elektrolisis (EL)	Air (kemurnian tinggi)	Terutama untuk penerapan air murni, laboratorium sampai industri skala kecil.
Photokimia ($\lambda < 185$ nm)	Iradiasi (abstraksi dari elektron)	O ₂ (udara), air (untuk kualitas air minum atau air murni)	Teknologi baru, laboratorium atau skala penuh.
Radiation chemistry	X-rays, radioaktif γ -rays	Air (murni)	Sangat jarang, hanya pada skala percobaan.
Thermal	<i>Light arc ionization</i>	Air	Sangat jarang, hanya pada skala percobaan.