PENURUNAN KADAR LOGAM BERAT LIMBAH CAIR INDUSTRI EMAS (PT. X) DI SURABAYA

**Nyoman Puspa Asri^{1*}, Rachmad Abadi², Arfina Hasmawati²,
dan Sita Alfian Mubarok²**

**¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas W.R. Supratman Surabaya
Jl. Arief Rachman Hakim No. 14 Surabaya 60111**

**²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Adhitama Surabaya
Jl. Arief Rachman Hakim No. 100 Surabaya 60111
Email: nyoman_puspaasri@yahoo.com**

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menurunkan kadar logam berat pada limbah cair industri emas (PT. X) di Surabaya. Limbah cair dari industri perhiasan emas sebagian besar merupakan limbah anorganik dengan kandungan asam yang cukup tinggi (pH rendah). Metode yang digunakan adalah metode presipitasi (pengendapan) dengan beberapa variabel yaitu jenis bahan pengendap (NaOH dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$), pH larutan dan waktu pengendapan. Dari hasil penelitian diketahui bahwa dengan penambahan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ maupun NaOH, semakin tinggi pH, maka semakin besar pula persen penurunan logam Cu, Ni, Zn, dan Fe. Demikian pula dengan variabel waktu pengendapan maka semakin lama waktu pengendapan maka semakin besar persen penurunan logam Cu, Ni, Zn, dan Fe. pH optimum yang dapat menurunkan kadar logam Cu, Ni, Zn dan Fe adalah pada pH 12. Besarnya persen penurunan logam Cu, Ni, Zn dan Fe dengan penambahan presipitan NaOH berturut - turut adalah 99,993%, 99,877%, 99,946% dan 99,935%. Besarnya persen penurunan logam Cu, Ni, Zn dan Fe dengan penambahan presipitan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ berturut-turut adalah 99,994%, 99,936%, 99,949% dan 99,941%, sedangkan waktu pengendapan yang optimum adalah pada 30 menit. Berdasarkan hasil penelitian terlihat bahwa presipitan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lebih baik dibanding NaOH.

Kata kunci: Logam berat, limbah cair, presipitasi

Abstract

This research has purpose to reduce heavy metal contain in liquid waste of gold industries (PT. X) in Surabaya. Most of liquid waste from gold jewellery industry is an inorganic waste with high acid composition (low pH). The method being used is precipitation method with some variables such as type of presipitaioir, pH of solution and time of precipitation. From the research's result with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and NaOH, the higher the pH, the higher the percentage removal of metal Cu, Ni, Zn, and Fe. The same result with variables of precipitation's time when the longer flocculation time, the higher the percentage removal of metal (Cu, Ni, Zn and Fe). The optimum pH that can decrease metal content Cu, Ni, Zn and Fe, is 12. The percentage of removal with additional NaOH in order are 99.93%, 99.77%, 99.46%, and 99.35%, with additional $\text{Ca}(\text{OH})_2$ are 99.94%, 99.936%, 99.949%, 99.941%, meanwhile the optimum time of precipitation to decrease metal concentrate is 30 minute. So from the result the addition of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ is much better than NaOH.

Keywords: Heavy metals, liquid waste, presipitation

*korespondensi

1. Pendahuluan

PT. X (industri perhiasan emas di Surabaya Timur) merupakan industri yang menghasilkan perhiasan dari bahan emas, dimana dalam proses pembuatan perhiasan tersebut menghasilkan limbah cair yang banyak mengandung logam berat. Apabila limbah ini langsung dibuang ke badan air maka dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan sekitar.

Limbah industri PT. X ini memiliki kandungan logam-logam berat yang dapat disetarakan dengan limbah industri *electroplating*. Limbah cair dari industri perhiasan emas sebagian besar merupakan limbah anorganik dengan kandungan asam yang cukup tinggi.

Tabel 1. Karakteristik Limbah Cair PT. X

Komponen	Cu	Ni	Zn	Fe
Kandungan Logam (ppm)	29627,79	187,5	295,75	2562,79
Standard Baku Mutu	5	1	20	20

Tabel di atas menunjukkan bahwa kandungan logam berat yang berasal dari limbah cair PT. X seperti logam Cu, Ni, Zn, Cd dan Fe, melebihi kadar maksimum baku mutu limbah cair *electroplating*, sehingga perlu untuk dilakukan pengolahan limbah cair tersebut untuk mengurangi kadar logam berat sebelum di buang ke badan air. Untuk menurunkan kadar logam tersebut, PT. X telah melakukan pengolahan limbah sebelum dibuang ke badan air dengan menggunakan metode presipitasi, yaitu dengan menambahkan NaOH sebagai bahan presipitan pada pH 8,5-10, namun kadar logam berat masih di atas ambang batas baku mutu yang diijinkan.

Limbah cair PT. X berasal dari proses *refinery*, proses bombing dan glundung, proses pencucian dan proses pengaturan warna dan bilasan. Rachmad dkk. telah melakukan penelitian pendahuluan menggunakan sampel air limbah sebanyak 200 mL menggunakan metode Jar-tes dengan menggunakan komposisi air limbah dari keempat proses di atas sebagai variabel, dengan penambahan NaOH pada pH sekitar 8,5-10. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH awal limbah adalah 2, sedangkan komposisi limbah terbaik adalah 13,37% limbah dari bak penampung limbah I (proses *refinery*), 1,96% limbah dari bak penampung limbah II (proses bombing dan glundung),

5,72% limbah dari bak penampung limbah III (proses pencucian), 78,95% limbah dari bak penampung limbah IV (proses pengaturan warna dan bilasan), dengan penurunan kadar logam berat berkisar antara 96-98%. Roekmijati dkk. (2001), telah melakukan penelitian tentang "Presipitasi Bertahap Logam Berat Limbah Cair Industri Pelapisan Logam Menggunakan Larutan Kaustik Soda". Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa dengan variabel pH 4,6 dan 8 tidak berpengaruh secara signifikan terhadap penurunan kadar logam berat Cu dan Fe.

Dari latar belakang di atas, dapat diketahui bahwa kadar logam berat yang melebihi baku mutu pemerintah adalah logam Cu, Ni, Zn dan Fe sehingga dilakukan penelitian untuk menurunkan kadar logam-logam berat tersebut sampai sekecil mungkin dengan metode presipitasi. Banyak faktor yang mempengaruhi proses presipitasi, namun pada penelitian ini difokuskan pada variabel pH, waktu pengendapan dan jenis presipitan. Jenis presipitan yang digunakan adalah NaOH dan Ca(OH)_2 . Ca(OH)_2 digunakan sebagai pembanding NaOH yang selama ini digunakan dengan harapan didapat presipitan yang lebih efektif dan efisien.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan harga pH larutan dan waktu pengendapan yang memberikan persen penurunan logam Cu, Ni, Zn dan Fe yang paling besar. Di samping itu juga untuk mengetahui diantara dua presipitan yang digunakan mana yang lebih efisien.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi, sebagai bahan perbandingan maupun sebagai acuan bagi industri-industri yang sejenis dalam mengolah limbah cair terutama dalam penurunan logam berat yang terkandung didalamnya.

Teori Dasar

Pada dasarnya logam berat dalam air buangan dapat dipisahkan dengan berbagai cara yaitu dengan proses fisika, kimia dan biologi. Proses pengambilan logam berat yang terlarut dalam suatu larutan biasanya dilakukan dengan cara presipitasi, *reverse osmosis*, *ion exchange* dan adsorpsi.

Penurunan kandungan logam berat pada air limbah industri ini, dilakukan dengan proses fisik-kimia. Teknologi pengolahan air limbah yang mengandung logam-logam telah lama dikembangkan dan metode yang

umumnya digunakan adalah menggunakan prinsip presipitasi.

Pengolahan limbah dengan metode presipitasi merupakan salah satu metode pengolahan limbah yang banyak digunakan untuk memisahkan logam berat dari limbah cair. Dalam metode presipitasi kimia dilakukan penambahan sejumlah zat kimia tertentu untuk mengubah senyawa yang mudah larut ke bentuk padatan yang tak larut. Tiap-tiap logam memiliki karakteristik pH optimum presipitasi tersendiri, yaitu pH pada saat logam tersebut memiliki kelarutan minimum. Oleh karena itu pada limbah yang mengandung beragam logam presipitasi dilakukan secara bertahap, yaitu dengan melakukan perubahan pH pada tiap tahapannya sehingga logam-logam tersebut dapat mengendap secara bertahap.

Presipitasi kimia adalah suatu prosedur standar untuk menyisihkan atau menurunkan kandungan logam berat dari air dan air limbah. Pembentukan presipitat sangat ditentukan oleh penambahan bahan kimia sebagai pengikat logam-logam. Dosis bahan kimia yang dibutuhkan relative sulit dihitung secara teoritis, umumnya ditentukan melalui percobaan dalam skala laboratorium. Percobaan dengan penentuan dosis bahan kimia untuk proses presipitasi atau koagulasi ini sering disebut sebagai Jar-Test. Adapun yang mempengaruhi percobaan dengan Jar-Test ini, antara lain :

1. Bahan kimia yang dipakai untuk menurunkan kadar logam berat
2. Penambahan dosis presipitan
3. pH
4. Kecepatan pengadukan
5. Waktu pengendapan.

Penurunan kadar logam berat terutama tergantung pada dua faktor, yaitu :

1. Kelarutan teoritis yang membentuk spesies padatan terlarut sebagai fungsi dari konstanta kesetimbangan kelarutan, pH dan konsentrasi bahan pembentuk presipitat.
2. Pemisahan padatan dari larutan yang membawanya.

Logam-logam berat umumnya dipresipitasi sebagai hidroksidanya dengan penambahan Kapur Ca(OH)_2 atau Soda Api (NaOH) untuk menjaga minimum PH kelarutan. Ada beberapa jenis logam yang bersifat amfoter sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Kelarutan Chrom (Cr) dan Seng (Zn) secara teoritis minimum masing-masing pada pH 7,5 dan 10,2 menunjukkan

suatu kenaikan signifikan dalam konsentrasi jika di atas atau di bawah nilai pH tersebut (Day dan Underwood, 1991).

Gambar 1: Pengaruh pH pada logam berat sebagai Hidroksida

Pada beberapa keadaan faktor-faktor di atas dapat mengganggu proses presipitasi karena kelebihan ion-ion yang berbeda muatannya yang dapat menyebabkan presipitat tidak dapat mengendap atau dipisahkan dari air yang membawanya. Oleh karenanya diperlukan suatu tambahan bahan kimia yang membantu proses presipitasi. Bahan kimia ini disebut sebagai bahan kopresipitasi yang berfungsi untuk menyerap dan menggumpalkan. Logam yang bersifat kopresipitat adalah Aluminium hidroksida (Al(OH)_3) dan Feri hidroksida (Fe(OH)_3) (Eckenfelder, 1989).

Reaksi-reaksi Presipitasi hidroksida untuk semua logam-logam kationik (M) adalah sama dengan yang ditunjukkan dengan reaksi sebagai berikut:

Pemakaian kapur lebih menguntungkan daripada pemakaian soda api karena garam-garam kapur bersifat mengendap dan dapat bertindak sebagai kopresipitat. Kerugian pemakaian kapur adalah jumlah lumpur yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan dengan penggunaan

soda, tetapi lebih ekonomis karena harganya lebih murah dan mudah didapat.

Untuk presipitasi logam berat limbah cair dengan menggunakan kaustik soda, sebelumnya dilakukan penambahan NaHSO_3 40% untuk mengendapkan Cr(VI) , karena Cr(VI) sukar mengendap dengan menggunakan kaustik. Logam Cr mengalami kenaikan proses penyisihan dengan meningkatnya volume presipitan. Logam Cu , Fe dan Mn mengalami penurunan proses penyisihan logam dengan semakin besarnya volume presipitan. Proses penyisihan tertinggi untuk logam Cr 98,04% dicapai pada pH 8,2, Cu sebesar 99,94% pada pH 8,5, Fe sebesar 99,97% pada pH 7, sedangkan Mn sebesar 99,5% pada pH 8,8 (Roekmijati dkk., 2001).

Logam berat dapat pula dipresipitasi sebagai sulfida dan karbonat seperti dalam kasus pengolahan limbah timah. Kelarutan sulfida dan karbonat umumnya lebih rendah daripada bentuk hidroksida, sehingga lebih sulit mencapai konsentrasi luaran yang diinginkan.

Gambar 2. Pengaruh pH dan amoniak pada kelarutan Cu dan Cr.

Presipitasi karbonat baik untuk pengendapan logam Pb dan Ni . Pengolahan limbah yang mengandung logam kadang kala memerlukan pengolahan pendahuluan untuk menghilangkan ion-ion pengganggu proses presipitasi logam. Sianida dan amoniak dapat membentuk senyawa kompleks dengan logam-logam dan mengganggu proses presipitasi. Sianida dapat dihilangkan dengan klorinasi alkali atau dengan oksidasi katalitik,

akan tetapi limbah sianida yang mengandung nikel dan perak sulit untuk dihilangkan dengan metode klorinasi alkali. Amoniak bisa dihilangkan dengan aerasi khlorinasi titik retak. Kelarutan logam-logam dengan atau tanpa adanya amoniak sebagai fungsi pH dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada presipitasi arsen dan besi, oksidasi mungkin memerlukan penggunaan klor atau permanganate. Untuk pengolahan limbah khrom, khrom heksavalensi (Cr^{6+}) harus direduksi terlebih dahulu menjadi khrom trivalent (Cr^{3+}) dan kemudian di presipitasi dengan kapur (Day dan Underwood, 1991).

2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap meliputi persiapan sampel, percobaan dan analisis hasil. Penyiapan sampel sebanyak 200 mL dilakukan dengan mencampur keempat sumber limbah yaitu limbah dari proses *refinery*, limbah bombing dan glundung, proses pencucian, dan limbah pengaturan warna dan bilasan, masing masing 13,37%, 1,96%, 5,72% dan 78,95%. Proses presipitasi dengan metode Jar-Test dengan variabel pH 8, 9, 10, 11 dan 12, dengan pengadukan 100 rpm selama 10 menit. Selanjutnya larutan polimer kuriflok ditambahkan sebanyak 10 mL dan melakukan pengadukan dengan kecepatan 60 rpm selama 5 menit, serta menambahkan presipitan NaOH dan Ca(OH)_2 . Sampel didiamkan sesuai variabel waktu pengendapan yaitu 15, 20, 25 dan 30 menit. Analisis hasil dilakukan dengan metoda AAS. Persen penurunan kadar logam dihitung dengan rumus

$$\% \text{ Penurunan} = \frac{\text{Kadar awal} - \text{Kadar akhir}}{\text{Kadar awal}} \times 100\%$$

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis kandungan logam berat pada sampel awal maupun setelah eksperimen dilakukan dengan metode AAS. Gambar 3, 4, 5, dan 6 menunjukkan pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Cu , Ni , Zn dan Fe dengan penambahan presipitan NaOH pada waktu flokulasi sesuai dengan variabel (15, 20, 25 dan 30 menit). Dari gambar-gambar tersebut terlihat bahwa semakin besar pH maka persen penurunan logam semakin besar. Pada Gambar 4. terlihat bahwa dengan penambahan bahan presipitan NaOH dengan waktu pengendapan 30 menit, persen penurunan logam Fe pada pH 8, 9, 10, 11 dan

Gambar 3. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Cu dengan presipitan NaOH

Gambar 4. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Ni dengan presipitan NaOH

Gambar 5. Pengaruh pH terhadap persen penurunan Logam Zn dengan presipitan NaOH

Gambar 6. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Fe dengan presipitan NaOH

99,921%, 99,923%, dan 99,935%. Persen penurunan tertinggi adalah pada pH 12 yaitu sebesar 99,935%, hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi pH maka persen penurunan logam semakin besar. Literatur menyebutkan bahwa pH sangat berpengaruh pada saat ion-ion logam terikat dengan OH^- yang ada pada presipitan (NaOH) dan membentuk endapan. Reaksi ikatan ion-ion logam tersebut adalah sebagai berikut:

Selain itu semakin tinggi pH maka semakin besar konsentrasi ion OH^- sehingga harga hasil kali kelarutan ion-ion $[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]^2 > K_{sp} \text{Cu}(\text{OH})_2$, dan mengakibatkan semakin banyak Cu yang mengendap. Kondisi ini berlaku juga untuk logam-logam lainnya.

Gambar 7. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Cu dengan presipitan $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Gambar 8. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Ni dengan presipitan $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Gambar 7, 8, 9, dan 10 menunjukkan pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Cu, Ni, Zn dan Fe dengan penambahan

presipitan Ca(OH)_2 dengan variabel waktu pengendapan (15, 20, 25, 30 menit). Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin besar pH maka persen penurunan masing-masing logam semakin besar.

Gambar 9. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Zn dengan presipitan Ca(OH)_2

Gambar 10. Pengaruh pH terhadap persen penurunan logam Fe dengan presipitan Ca(OH)_2

Pada Gambar 10 terlihat bahwa persen penurunan tertinggi adalah pada pH 12 yaitu sebesar 99,941%, hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi pH maka persen penurunan logam semakin besar. Dalam literatur menyebutkan bahwa pH sangat berpengaruh pada saat ion - ion logam terikat dengan OH^- yang ada pada presipitan (NaOH) dan membentuk endapan. Reaksi ikatan ion-ion logam tersebut adalah sebagai berikut :

Gambar 11 menunjukkan bahwa persen penurunan terbesar pada pH 12 dengan waktu pengendapan 30 menit adalah logam Cu baik dengan menggunakan presipitan NaOH maupun Ca(OH)_2 . Besarnya persen penurunan hampir mendekati 100%

yaitu 99,993% dengan menggunakan bahan presipitan Ca(OH)_2 dan 99,990% dengan menggunakan presipitan NaOH . Terlihat bahwa logam Cu sudah mengendap sempurna pada pH 12, hal ini terjadi karena cupri oksida memiliki kelarutan minimum pada pH 9,0 yaitu sebesar $10 \mu\text{g/L}$ (Haas dan Vamos, 1992) sehingga untuk mendapatkan persen penurunan logam Cu yang besar diperlukan pH yang lebih besar daripada pH kelarutan minimumnya.

Gambar 11. persen Penurunan logam Cu, Ni, Zn dan Fe dengan presipitan NaOH dan Ca(OH)_2 pada waktu 30 menit dan pH 12.

Persen penurunan logam Ni, Fe, dan Zn berturut-turut yaitu 99,877%, 99,941 %, 99,949% dengan presipitan NaOH dan 99,936%, 9,946%, 9,946% dengan presipitan Ca(OH)_2 . Penurunan logam ini lebih kecil dibandingkan dengan penurunan logam Cu. Hal ini disebabkan karena logam-logam tersebut mempunyai pH kelarutan minimum yang lebih besar (pH Ni =10-11; pH Fe = 10; pH Zn = 10,5) dari pada pH kelarutan minimum Cu (pH = 9) sehingga untuk mengendapkan logam-logam tersebut dibutuhkan pH yang lebih tinggi daripada pH Cu. Dari Gambar 11 juga terlihat bahwa penambahan presipitan kapur Ca(OH)_2 lebih bagus dibanding dengan menggunakan kaustic soda (NaOH) dalam mengurangi kadar logam, hal itu disebabkan kapur mengendapkan logam lebih cepat dan dapat bertindak sebagai kopresipitat (Haas dan Vamos, 1992).

Reaksi-reaksi Presipitasi hidroksida untuk semua logam-logam kationik (M) adalah sama dengan yang ditunjukkan dengan reaksi sebagai berikut :

Perbedaan penambahan presipitan NaOH dengan Ca(OH)_2 dari segi efisiensi biaya maupun operasionalnya ditunjukkan dengan tabel di bawah :

Tabel 2. Perbandingan koagulan NaOH dan Ca(OH)_2 (Eckenfelder, 1989)

Parameter	NaOH	Ca(OH)_2
Biaya operasional	Mahal	Murah
Lumpur yang dihasilkan	Sedikit	Banyak
Kecepatan pengendapan	Lambat	Cepat

Dari Tabel 2 di atas terlihat bahwa kerugian menggunakan kapur adalah jumlah lumpur yang dihasilkan lebih banyak dibandingkan dengan penggunaan NaOH, tetapi Lumpur yang dihasilkan sebagai limbah padat dapat diolah lagi menjadi Paving. Secara ekonomi harga kapur lebih murah dibandingkan dengan NaOH.

Dari penelitian yang telah dilakukan oleh Roekmijati dkk. (2001), dalam penurunan logam berat Cu dan Fe dengan variable pH 4, 6 dan 8 tidak begitu berpengaruh terhadap penurunan kadar logam karena pH minimal dari kedua logam tersebut adalah pada pH 10 untuk logam Cu dan 12 untuk logam Fe. Penelitian ini menggunakan variabel pH 8, 9, 10, 11 dan 12 untuk menentukan pH optimum dari masing - masing logam. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa pH optimum untuk logam Cu dan Fe ada di atas pH 12.

Gambar 3-10 menunjukkan bahwa semakin lama waktu pengendapan maka persen penurunan logam semakin besar. Persen penurunan logam optimum dicapai pada waktu 30 menit untuk presipitan Ca(OH)_2 maupun NaOH. Hal ini disebabkan bahwa semakin lama waktu pengendapan maka ikatan-ikatan logam dengan presipitan akan semakin banyak terbentuk, yang mana ikatan-ikatan logam ini akan membentuk flok-flok dan mengendap, sehingga logam yang terlarut dalam air semakin kecil dan persen penurunan logamnya akan semakin besar.

Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Persen penurunan terbesar pada pH dan waktu flokulasi optimum dengan penambahan presipitan NaOH adalah logam Cu dengan persen penurunan sebesar 99,993%. Sedangkan persen penurunan terbesar pada pH dan waktu flokulasi optimum dengan penambahan presipitan Ca(OH)_2 adalah logam Cu dengan persen penurunan sebesar 99,994%.
2. Waktu optimum yang dicapai oleh presipitan NaOH dan Ca(OH)_2 dalam mengendapkan logam-logam adalah 30 menit.
3. Penambahan presipitan Ca(OH)_2 lebih baik dibandingkan NaOH karena menghasilkan persen penurunan logam Cu, Ni, Zn dan Fe lebih besar dan dari segi efisiensi biaya maupun pengolahannya.

Daftar Pustaka

- Day, R. A. Jr.; Underwood, A. L., *Analisa Kimia Kuantitatif*, Edisi 4, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1991.
- Eckenfelder, W. W., Jr., *Industrial Water Pollution Control*, 2nd Ed., McGraw-Hill International, Singapore, 1989.
- Haas, C. N.; Vamos, R. J., *Hazardous and Industrial Waste Treatment*, Prentice Hall, Engelwood Cliffs, New Jersey, 1992.
- Roekmijati, W. S.; Praswasti PDK. W.; Yulianti, *Presipitasi Bertahap Logam Berat Limbah Cair Industri Pelapisan Logam Menggunakan Larutan Kaustik Soda*, Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, 2001, <http://www.chemeng.ui.ac.id> (akses Juli 2008).
- Patterson, J. W., *Industrial Wasterwater Treatment Technology*, 2nd Edition, McGraw-Hill International, Singapore, 1989.