

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bagian tinjauan pustaka ini akan menjelaskan mengenai sifat-sifat sianida, industri pelapisan logam yang ada di Indonesia, serta jenis-jenis pengolahan limbah sianida yang telah ada dan dikembangkan.

2.1 Sianida sebagai salah satu bahan berbahaya

Sebagai salah satu bahan kimia yang berbahaya, konsentrasi sianida yang diijinkan dalam bentuk HCN pada udara yang tidak terpolusi adalah 0,2 ppm, dan pada air minum di Amerika bervariasi antara 0,001 ppm sampai 0,011 ppm. Sianogen khlorida terbentuk sebagai hasil khlorinasi air dengan konsentrasi antara 0,00045 ppm sampai 0,0008 ppm pada air minum di 35 kota di Amerika. Sedangkan **rokok** adalah sumber utama paparan sianida di masyarakat yang tidak bekerja pada industri yang menggunakan sianida. Bahan ini diudara sebagian besar berbentuk gas dan sebagian kecil terdispersi pada partikulat di udara yang akan terdeposisi di tanah atau perairan atau terlarut oleh hujan atau salju. Waktu paruh HCN di atmosfer adalah 1 sampai 3 tahun. Sumber utama sianida pada air dan tanah adalah dari proses pertambangan logam, industri kimia organik, pabrik besi atau baja, serta Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Sumber lain adalah asap kendaraan bermotor, emisi beberapa industri kimia, pembakaran sampah dan penggunaan pestisida mengandung sianida (ATSDR 2006).

Bentuk umum sianida adalah HCN, NaCN dan KCN, dimana HCN adalah gas tidak berwarna yang beraroma almond di udara, pahit/tidak enak. Di tubuh manusia sianida akan diubah menjadi thiosianat yang kurang berbahaya dibandingkan dengan sianida. Efek toksik sianida pada tubuh adalah pada konsentrasi $\geq 0,05$ mg/dL dalam darah, dan efek mematikan apabila konsentrasi sianida mencapai $\geq 0,3$ mg/dL di dalam darah. Apabila terhirup pada konsentrasi ≥ 546 ppm selama 10 menit akan menyebabkan kematian pada manusia. Demikian pula apabila terhirup sianida pada konsentrasi ≥ 110 ppm selama 1 jam dapat menjadi ancaman kematian bagi manusia. Pada konsentrasi sianida 6-10 ppm yang terhirup oleh manusia akan dapat menyebabkan kesulitan bernapas, sesak dada, muntah-muntah, perubahan pada darah, sakit kepala dan pembesaran pada kelenjar tiroid (ATSDR, 2006)

Vitamin B12 adalah bahan kimia alam yang mengandung sianida untuk mencegah leukimia, akan tetapi sianida ini merupakan bagian dari senyawa vitamin B12 yang tidak membahayakan.

Beberapa ketentuan dan rekomendasi atas dosis sianida adalah sebagai berikut (ATSDR, 2006):

- EPA mensyaratkan maksimum sianida pada air minum 0,2 ppm
- EPA mensyaratkan maksimum pada pestisida adalah 50 ppm
- OSHA-PEL (*Permissible Exposure Limit*) menetapkan konsentrasi HCN 10 ppm (1 mg/Nm³) di udara 8 jam sehari, 40 jam seminggu
- NIOSH-REL (*Respiratory Exposure Limit*) menetapkan konsentrasi HCN 4,7 ppm (5 mg/Nm³) untuk 15 menit dan CEL (*Ceiling Exposure Limit*) sianida 4,7 ppm (5 mg/Nm³) untuk 10 menit, sedangkan level IDLH untuk bahan ini adalah 50 ppm pada HCN atau 25 mg/Nm³ pada garam-garam sianida.

Beberapa bentuk senyawa sianida dan batasan konsentrasi TLV (*Threshold Limit Value*) dan LD₅₀ (*Lethal Dose 50*) disampaikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Batas Konsentrasi Toksik beberapa senyawa Sianida dan turunannya

Senyawa	Formula	Bentuk Fisik	TLV	LD50
Hidrogen Sianida	HCN	Gas	5 mg/m ³	1 mg/kg manusia
Kalium Sianida	KCN	Padat	5 mg/m ³	10 mg/kg tikus 2.85 mg/kg manusia
Natrium Sianida	NaCN	Padat	5 mg/m ³	6.44 mg/kg tikus 2.85 mg/kg manusia
Sianogen Klorida	CNCl	Gas	0.3 ppm	
Natrium Sianat	NaCNO	Padat		260 mg/kg tikus kecil
Kalium Sianat	KCNO	Padat		320 mg/kg tikus kecil
Kalium Ferri Sianida	K ₃ [Fe(CN) ₆]	Padat		1600 mg/kg tikus

Sumber: (Sax, Merck-Laporan EPA)

TLV adalah Nilai Ambang Batas (*Threshold Limit Value*) merupakan rata-rata waktu 8 jam sehari, 40 jam seminggu dimana pekerja terpapar tanpa mendapatkan efek yang permanen.

LD50 adalah dosis mematikan (*Lethal Dose*) pada 50% makhluk uji tertentu.

2.2 Industri Pelapisan Logam (*electroplating*) di Indonesia

Jumlah industri pelapisan logam yang dapat tercatat sampai saat ini mencapai puluhan ribu dengan skala industri yang berbeda-beda mulai dari skala rumahan sampai

industri berskala menengah, hanya beberapa industri yang digolongkan pada industri besar seperti Maspion di Jawa Timur.

Istilah pelapisan logam menggunakan listrik (*electroplating*) adalah proses melapisi logam atau bahan padat lain menggunakan lapisan logam yang bersifat lebih baik (lebih mulus, bersinar dan tahan karat) dengan bantuan larutan bahan kimia penghantar listrik (*elektrolit*) yang mengandung bahan logam pelapis (ion metal seperti Cr, Ni, dll) dan bantuan arus listrik (Purwanto, 2005).

Pada beberapa perusahaan pelapisan logam (*electroplating*) misalnya untuk produksi suku cadang kendaraan bermotor (terutama roda dua) dengan keluaran limbah berkisar 200-500 m³/hari, beberapa diantaranya telah melakukan pemisahan limbah (*segregasi*) dari jenis limbah lainnya. Jika 50% dari volume limbah sianida ini dapat didaurulang maka beban unit pengolahan akan lebih ringan dan mengurangi biaya pengolahan limbah sianida. Selain itu biaya yang berkaitan dengan pembelian bahan baku sianida akan berkurang cukup signifikan.

Beberapa masalah lain yang ditemukan pada industri pelapisan logam skala kecil dan menengah adalah pencampuran limbah pada industri yang umumnya mempunyai keluaran limbah cukup sedikit yaitu antara 5-50 m³/hari misalnya pada industri yang memproduksi asesoris (asesoris untuk tas, sepatu, dll), serta pH yang bervariasi dari industri satu dengan industri yang lain, ada yang melakukan pekerjaan pelapisan pada pH 4-6 (asam) dan juga pada pH 11-13 (basa). Sebagai contoh keluaran limbah dari industri pelapisan logam disampaikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Contoh Perbandingan Konsentrasi Efluen dan Baku Mutu Industri Pelapisan Logam

Parameter	Efluent	BML*
TSS	525 mg/L	20 mg/L
CN-	6,390 mg/L	0,2 mg/L
Cr Total	12,87 mg/L	0,5 mg/L
Cr ⁶⁺	8,06 mg/L	0,1 mg/L
Cu	48,22 mg/L	0,6 mg/L
Zn	70,44 mg/L	1,0 mg/L
Ni	208,5 mg/L	1,0 mg/L
Cd	0,46 mg/L	0,05 mg/L
Pb	0,01 mg/L	0,1 mg/L
pH	4,9	6 – 9

Sumber : Info limbah Cair Industri Electroplating di Tangerang

*KepMenLH 51/10/1995 BML Cair Industri Pelapisan Logam

2.2.1 Masalah lingkungan di Industri Pelapisan Logam

Industri pelapisan logam yang umumnya merupakan industri berskala kecil dan menengah yang mempunyai jumlah cukup banyak dan tersebar merata hampir di semua kota. Penggunaan bahan kimia berbahaya yang cukup intensif walaupun pada skala yang tidak terlalu besar menyebabkan adanya permasalahan tersendiri pada industri jenis ini.

Karakter penggunaan bahan pelapisan yang mengandung logam-logam berat seperti Ni, Cr, Zn, asam-asam kuat seperti sulfat dan klorida, basa kuat seperti soda kostik (NaOH) dan ion Sianida membuat industri ini digolongkan pada industri yang cukup mencemari lingkungan, dan pemerintah memberikan fokus perhatian yang cukup besar pada industri ini terutama pada masalah lingkungannya.

Pendekatan penyelesaian masalah lingkungan industri pelapisan logam telah dilakukan dengan beberapa upaya dari pemerintah, diantaranya melokalisasi industri jenis ini pada suatu lingkungan industri yang diharapkan dampaknya dapat dikelola secara bersama-sama. Upaya pendampingan dan pemberian bantuan teknis produksi bersih juga dilakukan untuk industri ini, agar limbah dan buangnya dapat diminimisasi dari sumber dibangkitkannya limbah (*Pollution Prevention Principle*).

Buku-buku panduan untuk melakukan produksi yang lebih ramah lingkungan dengan pendekatan produksi bersih juga telah diterbitkan khusus untuk industri pelapisan logam, sehingga diharapkan jenis industri yang terus berkembang sesuai dengan kebutuhan masyarakat akan barang-barang logam ini dapat lebih efisien dan mempunyai jumlah limbah yang dibangkitkan lebih sedikit.

2.2.2 Pemilahan Sistem Pengolahan Limbah Sianida

Pemilahan sistem pengolahan limbah sianida dari berbagai proses yang sudah ada perlu dilakukan, hal ini berkaitan dengan baku mutu yang ditetapkan untuk sianida pada industri pelapisan listrik yaitu 0,2 ppm (Kep MenLH 51/1995) yang cukup ketat. Dengan baku mutu sebesar ini maka beberapa industri pelapisan listrik yang mempunyai rentang konsentrasi buangan proses sianida antara 6-60 ppm, dimana artinya efektifitas pengolahan sianida harus pada kisaran 97%-99,7%. Pada level ini diperlukan pengolahan lanjut (*Advanced treatment*), karena sistem konvensional biasanya hanya mempunyai maksimum efektifitas pengolahan 90%.

Beberapa metode proses yang sudah dilakukan untuk pengolahan limbah sianida adalah :

- Menggunakan membran mikropori, sistem penukar anion (resin basa), untuk kemudian asam sianida hasil regenerasi dinetralisasi kembali menggunakan NaOH menjadi NaCN (US Patent No. 4895659)
- Menggunakan unggun penukar ion tertentu untuk memisahkan sianida (US Patent 1981 No. 4267159)
- Melewatkan pada penukar anion (resin basa lemah) untuk mengkonsentrasikan sianida untuk kemudian dilakukan proses asidifikasi/volatilasi untuk mengambil sianida dari konsentratnya (US Patent 1987 No. 4708804)
- Menambahkan Ferro bisulfit yang akan membentuk bahan tak-larut Biru Prussian dan bahan lain yang kemudian dapat dipisahkan (US Patent 1982 No. 4312760)
- Menambahkan SO₂ atau alkali atau alkali tanah metal sulfit atau bisulfit, dengan oksigen berlebih dan katalis logam (biasanya tembaga) pada pH 5 sampai pH 12 (US Patent 1985 No. 4537686)
- Menghancurkan anion sianida menggunakan H₂O₂ dan campuran logam yang larut sebagai katalis (biasanya larutan tembaga) untuk meningkatkan laju reaksi pada kisaran pH 8,3 sampai pH 11 (US Patent 1971 No. 3617567)
- Asidifikasi-Volatilasi-Renetralsiasi (AVR) proses ini memanfaatkan sifat volatilitas alamiah HCN, Proses AVR dilakukan dengan cara memanaskan dan menyesuaikan pH antara 2 sampai 4 agar terdisosiasi dari garam/larutan metal kompleksnya dan terbentuk HCN untuk kemudian divolatilasi menggunakan gelembung-gelembung udara, kemudian direaksikan dengan NaOH agar terbentuk NaCN (US Patent 1971 No. 3592586)

Dari beberapa metode proses yang diuraikan pada patent di atas, beberapa proses umumnya digunakan pada pengolahan bijih di pertambangan, dan belum memperhatikan aspek pendaurulangan kembali bahan HCN. Beberapa metoda proses juga melibatkan volatilasi asam sianida yang cukup berbahaya bagi kesehatan pekerja.

Ozon sebagai oksidator sangat kuat (dengan potensial elektroda +1,24 V pada larutan alkali) memungkinkan untuk memberikan tingkat destruksi hingga lebih dari 99% dengan reaksi dua tahap destruksi Sianida seperti pada reaksi 2.1 dan 2.2 :



Kemudian ion Sianat dihidrolisa dengan kehadiran ozon berlebih dengan reaksi sebagai berikut :



Waktu reaksi yang dibutuhkan untuk oksidasi ion sianida seperti reaksi di atas umumnya adalah 10-30 menit pada sistem reaktor. Tahap reaksi kedua lebih lambat dari tahap reaksi pertama, dimana pada pH 10-12 kecepatan reaksi relatif konstan, dengan laju konsumsi ozon 1.8 – 2.0 gr ozon per gr CN⁻. Reaksi ini **tidak dipengaruhi oleh temperatur** (*Technical Bulletin, n.d.*).

Pada literatur lain untuk percobaan proses produksi tepung singkong yang mengandung sianida pada kisaran konsentrasi sianida 10; 20; 30; 40 mg/L yang disiapkan dari tepung singkong segar, dioksidasi menggunakan ozon pada laju pembangkitan 7,4; 15,0; 22,6 dan 30,0 g O₃/h, memberikan hasil bahwa kinetika reaksi oksidasi sianida adalah berorde satu terhadap sianida dan berorde nol terhadap ozon, konstanta reaksi yang didapat dari reaksi orde kesatu sianida menggunakan ozon adalah **2,76 menit⁻¹** (Somboonchai, Nopharatana, Songkasiri, 2007).

Penelitian lain pada limbah tailing (limbah tambang emas) yang mengandung sianida dilakukan menggunakan reaktor oksidasi ozon dengan sistem gelembung udara pada variasi kondisi pH, laju dosis ozon, laju alir gas, dan konsentrasi sianida, dimana pada penelitian awal digunakan larutan sianida sintetik dimana hasilnya menunjukkan reaksi adalah **orde satu terhadap konsentrasi ozon** pada gas dan **orde ke nol terhadap sianida** pada larutan. Konstanta reaksi yang diperoleh adalah **10⁻⁵ mol/L.s**. Secara stokhiometri reaksi ini adalah satu mol ozon bereaksi dengan satu mol sianida membentuk satu mol sianat (Pedroza, Alonso, Salas, 1988).

Penelitian yang juga dilakukan oleh Pedroza untuk limbah tailing pada **kondisi basa (pH = 10)** mengkonfirmasi reaksi oksidasi sianida menjadi sianat adalah **berorde satu terhadap ozon** dan **berorde nol terhadap sianida**, dengan reaksi seperti pada reaksi 2.1.

Laju oksidasi sianida dengan ozon jauh lebih cepat dari pada laju oksidasi sianat, sehingga didapatkan konsentrasi sianat masih ada didalam larutan pada saat sianida habis dioksidasi. Dua sistem kontaktor gas-cair yang digunakan pada percobaan ini (kolom

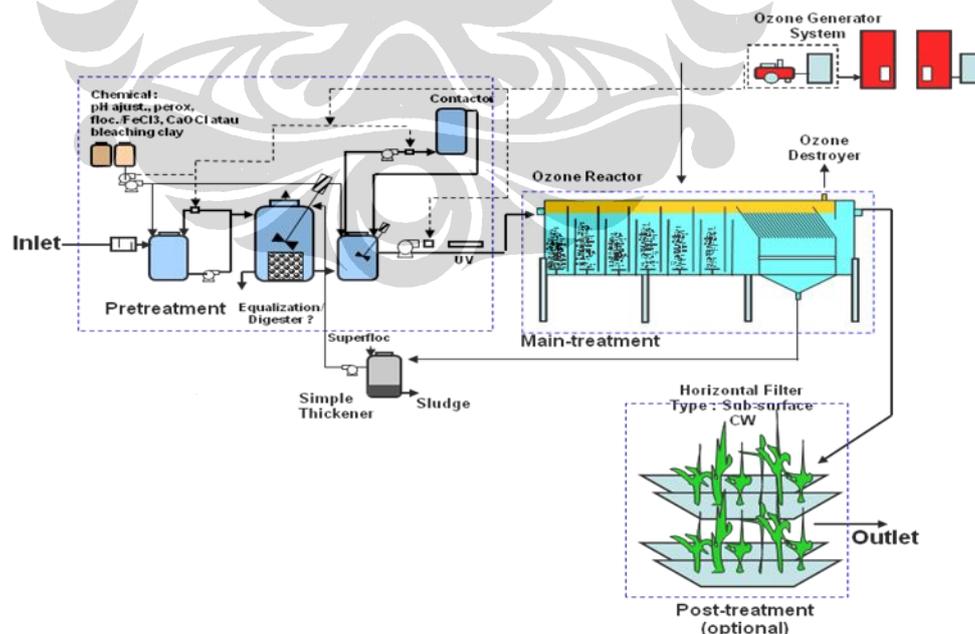
gelembung dan pengadukan secara mekanis) tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap laju oksidasi sianida, karena laju perpindahan masa ozon dari fasa gas ke fasa cair sangat cepat, oleh karena itu **hanya konsentrasi ozon di dalam gas yang menjadi faktor pembatas reaksi** (Pedroza, Aguilar, 2001).

Karena sifat Ozon yang akan berubah menjadi O_2 setelah mengoksidasi maka **ozon tidak memberikan kontribusi terhadap endapan yang dihasilkan**, sehingga endapan atau lumpur yang dihasilkan yang biasanya menjadi masalah pengelolaan lingkungan berikutnya menjadi relatif lebih sedikit dari pada metoda pengendapan lainnya.

Secara alamiah sianida juga dihasilkan di alam misalnya pada singkong, dan alam punya kemampuan untuk mengelola sianida ini, maka secara biologis juga sedang dikembangkan proses pengolahan bahan atau limbah mengandung sianida dengan memanfaatkan mikroorganisme berupa bakteri pseudomonas yang menghasilkan enzyme yang dapat bereaksi dan memecah/mendekomposisi sianida (Reese, n.d.)

Kombinasi moda pengolahan dilakukan dengan melakukan penyusunan reaktor ozonasi secara seri atau paralel, dengan sistem reaktor sirkulasi ataupun *cascade*.

Untuk menanggulangi masalah limbah sianida dari industri pelapisan listrik telah didesain peralatan destruksi sianida untuk beberapa industri pelapisan listrik seperti pada Gambar 2.1. (Tabina Lingkungan, 2008).



Gambar 2.1 Rencana Unit Pengolahan Sianida Pada Industri Lapis Listrik

Sumber gambar : Proposal Tabina Lingkungan

Kombinasi pengolahan akan dilakukan untuk pengolahan utama (*main treatment*), dimana pada pelaksanaannya dilapangan, sebagai pengganti pengolahan awal (*pretreatment*) dan/atau area sedimentasi (*sedimentation*) dapat digunakan membran yang diharapkan dapat memisahkan sianida yang dapat didaur ulang.

2.3 Pengolahan Limbah Mengandung Sianida yang telah dilakukan

Beberapa metode pengolahan limbah sianida yang telah dikembangkan dan diterapkan pada beberapa industri baik proses membran, proses oksidasi menggunakan klorin, sulfit dan peroksida, serta proses yang telah menggunakan ozon disampaikan pada sub bagian 2.3.1 sampai 2.3.3.

2.3.1 Metoda pemisahan menggunakan membran

Pemisahan menggunakan membrane telah dilakukan pada beberapa penelitian dan patent, diantaranya adalah fasilitas militer Angkatan Laut Amerika di Port Hueneme, CA dengan project SERDP (Strategic Environmental Research & Development Project), dan US Patent No. 4895659.

Pada penelitian SERDP digunakan membran ultrafiltrasi dengan metode *crossflow* dan pada US Patent 4895659 digunakan membran mikroporous. Belum didapatkan data-data hasil kedua penelitian tersebut, walaupun keduanya melakukan pengolahan untuk larutan pelapisan logam menggunakan listrik.

2.3.2 Metoda oksidasi menggunakan oksidator (Klor, Sulfit dan Peroksida)

Beberapa industri sudah mencoba menggunakan klor sebagai oksidator, akan tetapi penambahan bahan ini akan membawa pengaruh kenaikan angka BOD dan tingginya biaya pengolahan. Pada salah satu industri pelapisan logam menggunakan listrik di Tangerang dengan buangan sebanyak 220 m³/hari biaya pengelolaan limbahnya dengan klor diperhitungkan dapat mencapai 8 juta rupiah perhari (Eko, 2008).

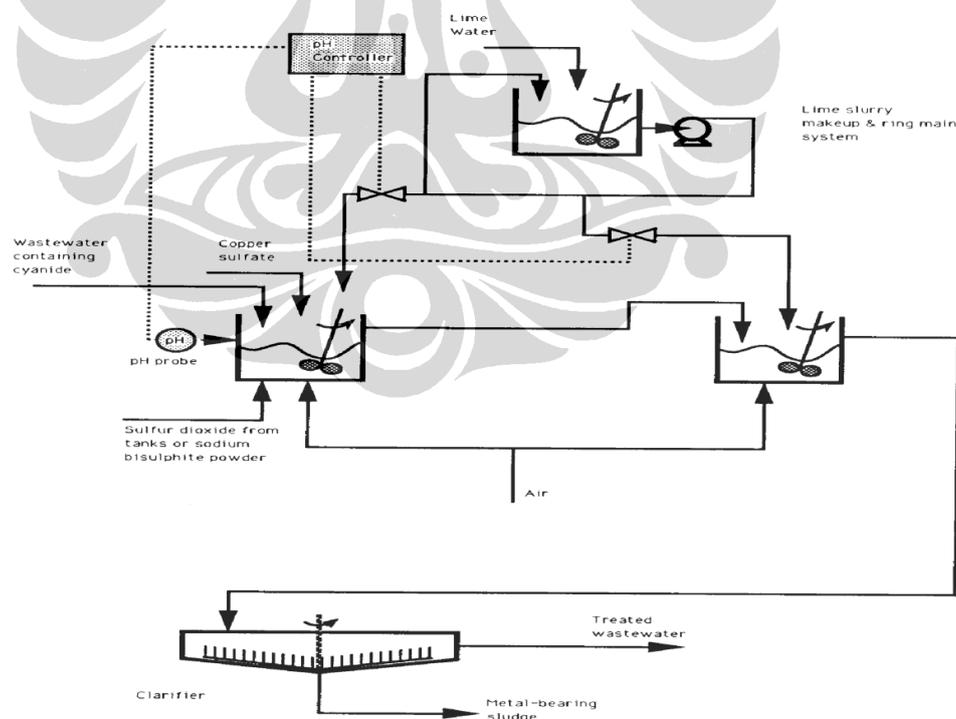
Tingginya biaya pengelolaan dan tingginya biaya pembuangan lumpur B3, disebabkan jumlah bahan pengendapan yang digunakan, dan makin banyak endapan lumpur dihasilkan. Untuk limbah jenis Sianida dengan penambahan hipoklorit destruksi sianida hanya akan dapat mencapai 95-98%, sehingga belum dapat mencapai baku mutu yang

ditetapkan oleh pemerintah untuk industri pelapisan listrik yaitu 0,2 ppm untuk Sianida jika umpannya mempunyai konsentrasi hingga 60 ppm (misalnya untuk salah satu industri lapis listrik di Tangerang). Untuk itu harus dicari alternatif pengelolaan limbah mengandung Sianida dengan tingkat destruksi yang dapat mencapai 99% atau lebih.

Dua metode menggunakan sulfit yaitu INCO dan Noranda seperti pada Gambar 2.2 dengan kinerja sebagai berikut, hasil Pengolahan dengan INCO (SO_2 3-7 gr/gr CN + Udara, katalis $\text{CuSO}_4 \pm 50$ mg/L, pada pH 8-10 :

- Konsentrasi Sianida turun $\pm 99,99\%$ dari 1680 mg/L menjadi 0.13 mg/L dengan waktu tinggal 97 menit pada reaktor kontinu satu tahap (Ingles and Scott 1987).
- Konsentrasi Sianida turun $\pm 99,97\%$ dari 420 mg/L menjadi 0.11 mg/L menggunakan dua reaktor kontinu secara seri dengan waktu tinggal masing-masing 26 menit (Ingles and Scott 1987).
- Konsentrasi sianida 335 mg/L pada pulp tailing 40% padatan pengolahan ini dapat mencapai konsentrasi 5 mg/L CN.

Kekurangan proses INCO adalah pengaruh temperatur, jika turun dari 25 ke 5 $^{\circ}\text{C}$ laju reaksi akan turun sepersepuluh.



Gambar 2.2 Skema proses INCO

Sumber gambar : Patent INCO

Hasil Pengolahan proses Noranda (SO_2 7 gr/gr CN + katalis CuSO_4) :

- Konsentrasi sianida turun \pm 99,7% dari 47 menjadi 0,15 mg/l (Konigsmann et al 1989).

Noranda mengembangkan alternatif proses dengan campuran tembaga dan besi sulfat (perbandingan Cu 3 gr/gr CN) pada skema reaksi 2.3.



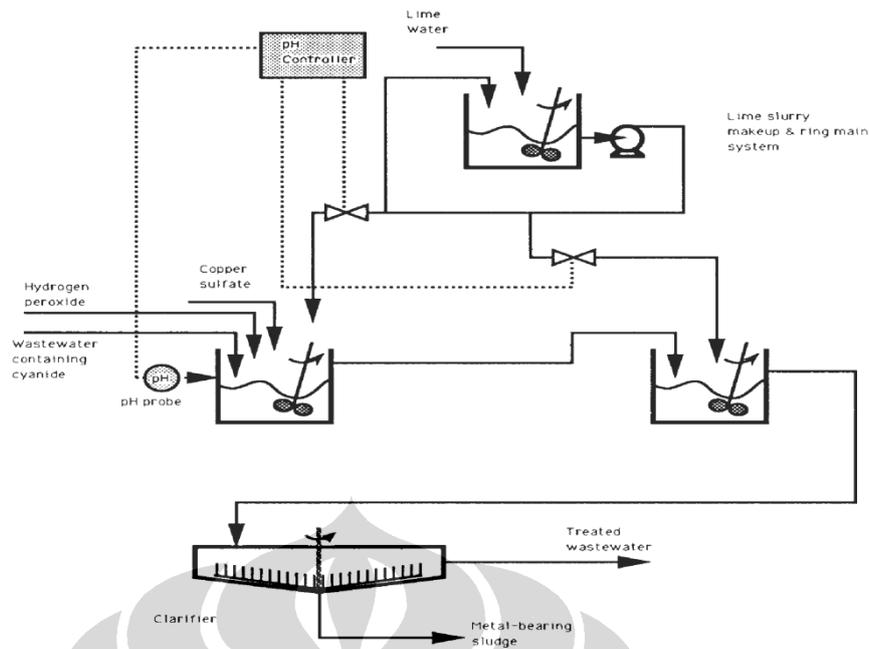
- Konsentrasi sianida turun \pm 99,5% dari 23 menjadi 0,13 mg/L. (Konigsmann et al, 1989)

Metoda Degussa seperti pada Gambar 2.3 yang menggunakan peroksida telah dikembangkan, pada proses H_2O_2 ini larutan sianida dioksidasi menjadi sianat oleh H_2O_2 dengan kehadiran ion tembaga pada skema reaksi 2.4. dan 2.5.



Ion sianat dihidrolisa menjadi ammonia dan karbonat:





Gambar 2.3 Skema Proses Degussa (H_2O_2)

Sumber gambar : Patent Degussa

- Konsentrasi Sianida turun $\pm 96,3\%$ dari 25,7 mg/L menjadi 0,94 mg/L dalam 27 jam (Griffiths, Degussa 1988).
- Indikasi waktu tinggal antara 45 menit sampai 2 jam (Higgs, 1992).
- Konsentrasi sianida pada efluen (heap) tereduksi menjadi 0.57 mg/L CN Total dan 0.09 mg/L CNWAD setelah 97 hari (McGrew and Thrall, sitasi oleh Brooks 1992).

2.3.3 Metoda oksidasi menggunakan ozon

Data spesifik pengolahan limbah pelapisan logam menggunakan ozon belum didapatkan, akan tetapi tiap-tiap jenis industri akan mengeluarkan limbahnya yang berbeda atau spesifik satu dengan lainnya walaupun sama-sama industri pelapisan logam menggunakan listrik, hal ini berkaitan dengan macam dan jenis benda yang dilapisi dan metode pelapisan yang digunakan.

Penelitian dengan menggunakan ozonasi bubble diffuser juga telah dikembangkan pada reaktor gelas fleksi tubular dengan tinggi 2,4 meter dan diameter 0,094 meter, diffuser dengan diameter 0,09 meter bukaan pori 5 μm , larutan umpan adalah sianida sintetik (NaCN) pada pH 11 (dengan penambahan NaOH), dengan ozon generator kapasitas maksimum 30 gr/jam. Penelitian ini menyimpulkan bahwa efisiensi oksidasi sianida

bergantung pada dosis spesifik ozon. Efisiensi maksimum yang diperoleh pada umpan 40 mg/L, adalah 93% pada dosis ozon 1,2 mol O₃/mol CN (Ordonez, Alonso, Salas, 2005).

Faktor penentu keberhasilan ozonasi adalah kontak yang baik antara fasa gas dengan fasa cair, dimana dua jenis kontaktor yang umum digunakan dan tidak memerlukan peralatan tambahan adalah system injektor dan gelembung (*bubble diffuser*).

Ozon larut di dalam air, pada 20 °C, kelarutan 100% ozon adalah hanya 570 mg/L (Kinman, 1975). Dimana ozon lebih larut dibanding oksigen, klor mempunyai kelarutan 12 kali dibanding ozon. Konsentrasi ozon yang biasa digunakan pada pengolahan air adalah 14% yang membatasi daya perpindahan masa ozon pada fasa gas ke dalam air. Sebagai konsekuensi konsentrasi yang biasa ditemukan pada pengolahan air adalah bervariasi dari <0.1 mg/L sampai 1 mg/L, walaupun konsentrasi lebih tinggi dapat dibuat pada kondisi optimum.



Tabel 2.3 Potensial Redoks Standar Pada Beberapa Spesies Oksidan

Spesies Oksidan	Eo, Volts	Potensial Relatif Terhadap Ozon
Fluor	3,06	1,48
Radikal Hidroksil	2,80	1,35
Atom oksigen	2,42	1,17
Ozon	2,07	1,00
Hidrogen peroksida	1,77	0,85
Radikal hidroperoksida	1,70	0,82
Permanganat	1,67	0,81
Khlor dioksida	1,50	0,72
Asam Hipokhlor	1,49	0,72
Khlor	1,36	0,66
Brom	1,09	0,53
Hidrogen peroksida	0,87	0,42
Iodin	0,54	0,26
Oksigen	0,40	0,19

*sumber Beltrán, Fernando J., 1955

Tabel 2.3 di atas menunjukkan bahwa kekuatan ion hidroksil adalah 1,35 kali dari kekuatan ozon, sehingga reaksi pada pH yang lebih tinggi ($\text{Basa} > 8$) melalui mekanisme tidak langsung dengan ion hidroksil terhadap senyawa sianida akan lebih efektif dibandingkan dengan reaksi langsung spesi ozon dengan senyawa sianida.