

KAJIAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH CAIR DARI INDUSTRI KULIT MENGGUNAKAN IRADIASI BERKAS ELEKTRON

Herry Poernomo

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan

Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 Ykbb Yogyakarta 55281

Tel. (0274) 484436, Fax. (0274) 487824, E-mail : herry_poernomo05@yahoo.co.id

Cahya Widiyati

Akademi Teknologi Kulit – Departemen Perindustrian

ABSTRAK

Telah dilakukan kajian pengolahan limbah cair dari industri penyamakan kulit menggunakan iradiasi berkas elektron. Tujuan kajian ini adalah untuk mendapatkan metoda detoksifikasi dan desinfeksi limbah cair dari industri penyamakan kulit menggunakan iradiasi berkas elektron. Proses detoksifikasi dan desinfeksi dilakukan dengan menembakkan berkas elektron ke dalam limbah cair yang mengandung Cr^{3+} atau Cr^{6+} toksik dan kemungkinan bakteri patogen. Hasil kajian menunjukkan bahwa mesin berkas elektron dapat mendetoksifikasi Cr^{3+} dan Cr^{6+} menjadi Cr^0 yang tidak toksik, H_2S menjadi SO_2 yang kemudian bereaksi dengan H_2O , O_2 , dan NH_3 hasil degradasi senyawa organik dalam limbah cair oleh berkas elektron menjadi $(NH_4)_2SO_4$ yang tidak toksik, mereduksi COD, dan dapat mendesinfeksi bakteri patogen dalam limbah cair industri penyamakan kulit.

Kata kunci : detoksifikasi, desinfeksi, limbah penyamakan kulit, berkas elektron

ABSTRACT

Study of liquid waste treatment from leather tannery industry using electron beam irradiation has been arranged. The objective of this study is to obtain the detoxic and disinfection method of liquid waste from leather tannery industry using electron beam irradiation. The detoxification and disinfection processes was carried out by bombarding of electron beam into liquid waste consist of Cr^{3+} or Cr^{6+} toxic, H_2S toxic, and pathogen bacterium possibility. Result of study indicate that the electron beam machine can detoxic Cr^{3+} or Cr^{6+} to Cr^0 non toxic, H_2S to SO_2 and then reacting with H_2O , O_2 , and NH_3 as the degradation result of organic compound in the liquid waste to $(NH_4)_2SO_4$ non toxic, reducing of COD, and disinfecting pathogen bacterium in the liquid waste of tannery industry.

Keywords : detoxification, disinfection, leather tannery waste, electron beam

PENDAHULUAN

Industri penyamakan kulit di Indonesia merupakan salah satu industri yang menghasilkan devisa non migas bagi negara.

Memproyeksikan pertumbuhan industri penyamakan kulit ke depan, maka diprediksi bahwa jumlah produksi dan perusahaan penyamakan kulit akan terus bertambah seiring dengan pertumbuhan ekonomi nasional dan global serta bertambahnya populasi penduduk Indonesia. Sejalan dengan kebijaksanaan pemerintah untuk melaksanakan pembangunan industri yang berwawasan lingkungan, maka pengembangan industri harus selalu dikaitkan dengan usaha-usaha nyata dalam menjaga kelestarian lingkungan. Peningkatan jumlah beban limbah cair dari industri penyamakan kulit disamping karena peningkatan kapasitas produksi juga disebabkan terjadinya transformasi

dari penyamakan nabati menjadi penyamakan krom sebesar 85% dari seluruh proses penyamakan kulit nasional. Hal ini menyebabkan dampak beban pencemaran terhadap lingkungan akan semakin tinggi^[1].

Proses pembersihan limbah cair dari industri penyamakan kulit secara konvensional dengan tahapan seperti segregasi, ekualisasi, flokulasi-koagulasi, dan biokimia kurang memberikan hasil yang memadai untuk membunuh bakteri patogen dan terutama tidak efektif untuk merusak telur-telur bakteri patogen. Hasil akhir dari proses pembersihan limbah cair dari industri penyamakan kulit adalah beningan (efluen) yang biasanya dibuang di badan sungai. Apabila proses pembersihan tersebut kurang baik, maka beberapa polutan kimia toksik dan bakteri patogen yang

terkandung dalam efluen akan mencemari badan sungai.

Dispersi polutan kimia toksis dan infeksi bakteri patogen pada limbah cair dari industri penyamakan kulit seringkali mencemari lingkungan. Untuk mereduksi dispersi polutan kimia toksis dan infeksi bakteri patogen dalam limbah cair tersebut, maka salah satu metode yang diperkirakan cukup aman, efektif, efisien, dan dapat dilakukan secara simultan dalam waktu yang sangat singkat adalah dengan menggunakan teknologi iradiasi berkas elektron. Efluen limbah cair pasca iradiasi diharapkan memenuhi syarat sebagai *make-up* air proses untuk proses pengerjaan basah (*beam house process*) pada proses penyamakan kulit atau dapat didispersi ke sungai sebagai air untuk pengairan pertanian.

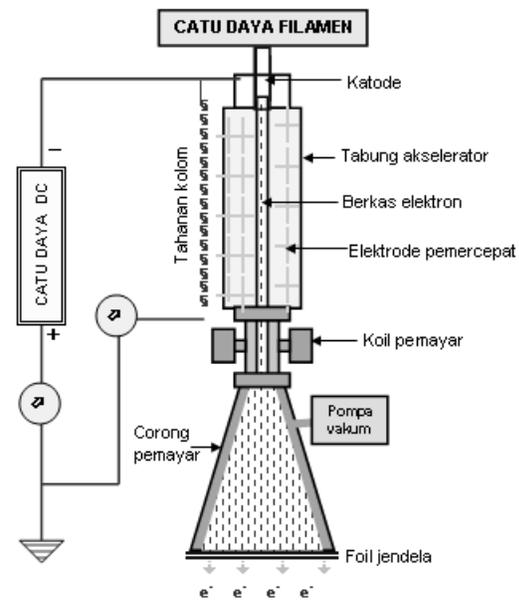
Berkas Elektron

Berkas elektron dihasilkan oleh sumber elektron dari Mesin Berkas Elektron (MBE) secara emisi termionik pada filamen yang dipanaskan. Energi berkas elektron yang keluar dari sumber elektron dinaikkan hingga mencapai energi yang diinginkan dengan dilewatkan melalui tabung pemercepat dengan cara memasang tegangan listrik pada elektrode-elektrode tabung pemercepat. Berkas elektron setelah keluar dari tabung pemercepat discan menggunakan sistem pemayar (*scanning system*) pada corong pemayar (*scanning horn*) agar berkas elektron dapat mengenai seluruh permukaan bahan yang diiradiasi. Bahan yang akan diiradiasi dilewatkan di bawah jendela MBE menggunakan beberapa sistem antara lain sistem ban berjalan (*belt conveyor*), sistem aerosol, sistem pengadukan, dan sistem yang lain. Untuk menjaga keselamatan terhadap pekerja, maka pengoperasian MBE dilakukan dengan bantuan sistem instrumentasi dan kendali. Mesin berkas elektron yang pertama kali selesai dirancang-bangun di Indonesia adalah MBE energi rendah 0,35 MeV/5 mA yang saat ini ada di Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) – BATAN, Yogyakarta.

Mesin berkas elektron adalah mesin yang menghasilkan berkas elektron dipercepat. Komponen utama MBE umumnya berupa sumber elektron, tabung pemercepat, generator tegangan tinggi, sistem pemayar dan vakum seperti ditunjukkan pada Gambar 1 [2, 3].

TEORI

Menurut *Committee on Treatment of Tannery Effluents* (1979) dalam Anonim [1], adanya sisa daging dan lemak dalam limbah cair, maka



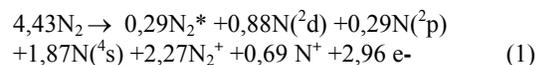
Gambar 1. Skema rangkaian peralatan MBE [2, 3]

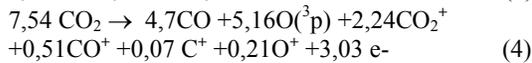
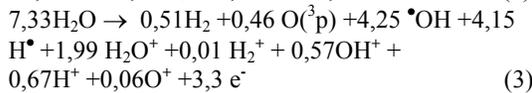
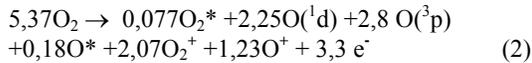
kemungkinan terdapat bakteri patogen dan bahkan bakteri anthrax dalam limbah cair. Sedangkan adanya senyawa nutrisi seperti lemak, sisa daging, karbohidrat, dan protein dalam limbah cair, maka menimbulkan gas seperti CO₂, NH₃, dan H₂S toksik dengan bau seperti telur busuk yang terjadi dari proses peruraian asam amino dalam senyawa nutrisi oleh aktivitas mikroorganisme.

Limbah cair yang langsung dibuang ke perairan tanpa pengolahan terlebih dahulu dapat menyebabkan penurunan kualitas air sungai dengan mekanisme pertumbuhan mikroorganisme yang berlimpah. Meningkatnya jumlah mikroorganisme dapat menyebabkan berkurangnya nilai oksigen terlarut atau *disolved oxygen* (DO), karena sebagian besar oksigen dipakai untuk respirasi mikroorganisme tersebut. Dengan menurunnya DO maka akan mempengaruhi kehidupan ikan dan biota air lainnya. Selain itu, buangan limbah cair ke perairan juga dapat menimbulkan bau seperti telur busuk dari gas H₂S [1, 4].

Radiolisis gas dalam udara oleh berkas elektron

Apabila udara dengan spesies reaktif utama seperti gas nitrogen (N₂), oksigen (O₂), karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O) terionisasi oleh berkas elektron pada energi terserap 100 eV atau 1,60 x 10⁻¹⁷ J, maka akan terjadi radiolisis membentuk beberapa ion, radikal bebas, dan molekul tereksitasi dengan reaksi sebagai berikut [5] :





Beberapa molekul yang teroksidasi bereaksi secara cepat dengan molekul-molekul latar dengan menghasilkan disosiasi tambahan, antara lain atom oksigen $\text{O}(\text{d})$ bereaksi cepat dengan molekul uap air H_2O membentuk tambahan radikal OH^* .

Radiolisis Kandungan Air dalam Limbah Cair

Ionisasi air oleh berkas elektron sekarang ini sudah diketahui secara jelas seperti ditunjukkan pada reaksi (3). Dari reaksi (3), ion H_2O^+ bereaksi dengan elektron (e^-) membentuk elektron termal (e^-_{th}). Elektron termal bereaksi dengan molekul air membentuk elektron terhidrasi (e^-_{aq}) dengan reaksi sebagai berikut [6]:



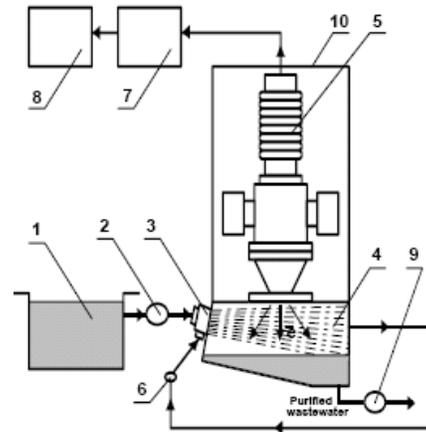
Apabila air terionisasi oleh elektron (e^-), maka energi penganan diserap oleh air membentuk radikal OH^* , elektron terhidrasi (e^-_{aq}) dan atom H^* sebagai radikal bebas yang reaktif dan bersifat sebagai reduktor kuat, serta H_2O_2 dan H_2 yang terbentuk karena reaksi cepat. Reaksi gross pada radiolisis air oleh berkas elektron dan nilai G (jumlah molekul yang ditukar per 100 eV energi terserap) pada pH 7 disajikan sebagai berikut [6, 7, 8]:

berkas (e^-)



Nilai G ($\mu\text{mol/J}$) pada pH 7 : (2,7) (0,6)(2,8) (0,45) (0,7) (3,2) (0,5)

Beberapa oksidator yang berupa radikal bebas antara lain OH^* mempunyai potensial oksidasi elektrokimia (E_0) = 2,8 V, $E_0\text{O}^*$ = 2,42 V, $E_0\text{H}_2\text{O}_2$ = 1,78 V, dan $E_0\text{HO}_2^*$ = 1,70 V. Oksidator yang bukan radikal bebas antara lain fluorin dengan E_0 = 3,06 V, $E_0\text{O}_3$ = 2,08 V, $E_0\text{KMnO}_4$ = 1,67 V, E_0 hipoklorit = 1,49 V, $E_0\text{Cl}_2$ = 1,36 V, E_0 klorin dioksida = 1,27 V, dan $E_0\text{O}_2$ dalam udara = 1,23 V. Dilihat dari urutan nilai potensial oksidasi elektrokimia, maka radikal bebas yang termasuk oksidator kuat adalah OH^* , O^* , H_2O_2 , dan HO_2^* [9, 10].



Keterangan :

1. Penampung umpan limbah cair
2. Pompa
3. Penyemprot
4. Ruang iradiasi
5. Akselerator elektron
6. Turboblower
7. Catu daya
8. Meja kontrol
9. Pompa
10. Shielding

Gambar 2 Skema pilot plant pengolahan air limbah dengan berkas elektron sistem aerosol [11]

PEMBAHASAN

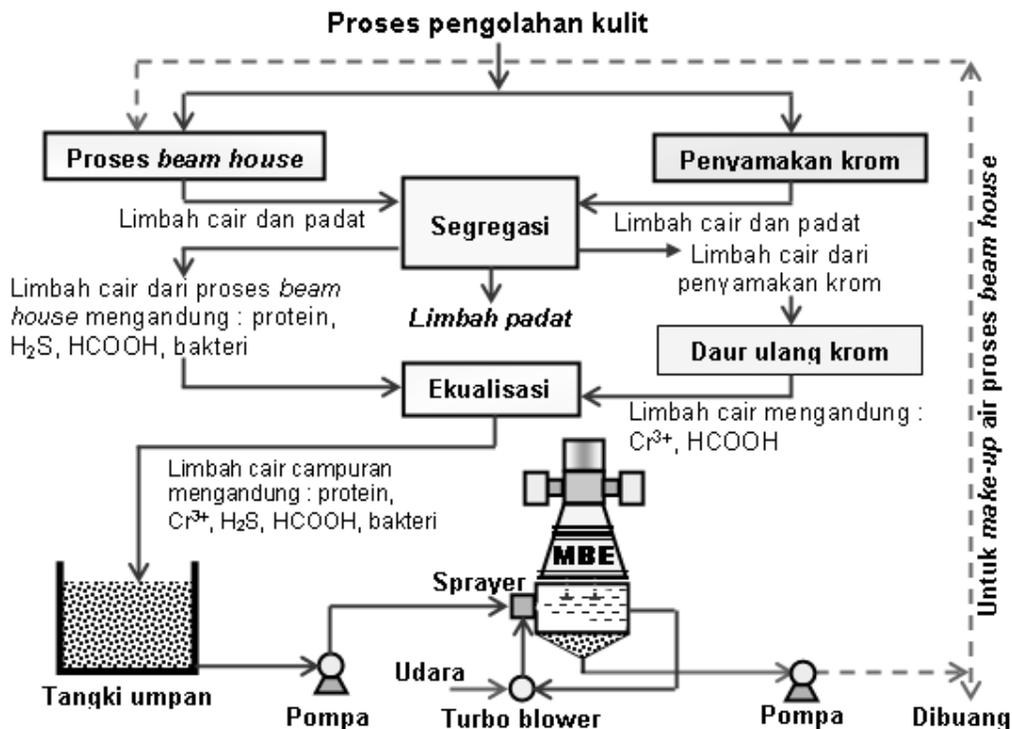
Detoksifikasi Polutan B3 dalam Air Limbah dengan Berkas Elektron

Penelitian yang telah dilakukan oleh Pikaev (1997) [11] dari *Institute of Physical Chemistry of the Russian Academy of Sciences* mendapatkan hasil bahwa berkas elektron dengan energi 0,3 MeV dan daya maksimum 15 kW dapat mendetoksifikasi polutan kimia (Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{6+}), mereduksi COD dan BOD), dan membunuh mikroba patogen yang terdapat dalam *municipal wastewater*. Penelitian dilakukan dengan cara sistem aliran aerosol air limbah dalam ruangan iradiasi yang dikenai berkas elektron seperti pada Gambar 2 [11, 12].

Berkas elektron yang dihasilkan oleh akselerator elektron dengan energi 0,3 MeV tersebut cukup efektif mereduksi polutan kimia dan membunuh bakteri yang terdapat dalam *municipal wastewater* seperti ditunjukkan pada Tabel 1 [11, 12].

Tabel 1. Polutan dalam *municipal wastewater* yang tereduksi oleh berkas elektron.

Parameter	Sebelum Iradiasi	Dosis, kGy	Setelah Iradiasi
Warna (unit)	160	1,3	20
Transparansi (cm)	1,3	1,3	20
TSS (mg/L)	156	1,3	5
Bau (force)	4,5	1,4	0
COD (mg/L)	412	2,5 – 4,6	4 - 12
BOD ₅ (mg/L)	18 - 24	0,8 – 1,3	7,9 – 9,2
Sulfat (mg/L)	283	0,8 – 1,3	160
Phospat (mg/L)	8,8	0,8 – 1,3	4,3
Chlorit (mg/L)	48	0,8 – 1,3	23
Total jumlah mikroba (sel/cm ³)	10 ⁵	1,3	< 1

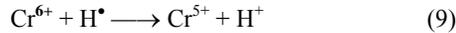
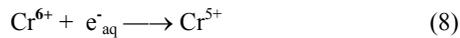


Gambar 3. Konsep pengolahan limbah cair penyamakan kulit dengan MBE

Pengolahan Limbah Cair dari Industri Penyamakan Kulit Menggunakan MBE

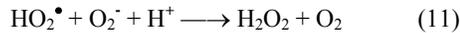
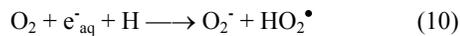
Dengan mengadopsi penelitian yang telah dilakukan oleh Pikaev dengan sistem aliran aerosol seperti Gambar 2, maka proses detoksifikasi dan desinfeksi limbah cair dari industri penyamakan kulit dapat dilakukan dengan cara seperti pada Gambar 3.

Limbah cair disemprotkan ke dalam ruangan iradiasi (*irradiation chamber*) dengan sistem aliran aerosol, kemudian diiradiasi dengan berkas elektron. Partikel aerosol limbah cair mengandung kation toksis akan terkena elektron sehingga terjadi reaksi antara ion-ion dengan elektron terhidrasi (e^-_{aq}) dan atom H^\bullet yang terbentuk dari radiolisis air. Contoh reduksi Cr^{6+} toksis menjadi krom netral (Cr^0) tidak toksis dijelaskan dengan reaksi sebagai berikut ^[11, 13, 14]

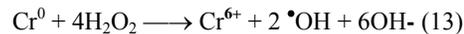


Ion Cr^{5+} adalah ion yang tidak stabil dan selanjutnya tereduksi oleh e_{aq}^- dan H^\bullet menjadi Cr^{3+} yang stabil. Demikian seterusnya akhirnya Cr^{3+} tereduksi oleh e_{aq}^- dan H^\bullet menjadi Cr^0 netral yang lebih stabil dari pengaruh oksidator alam lemah seperti oksigen (O_2).

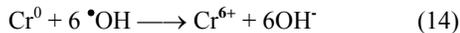
Jika air limbah dijenuhkan dengan udara, maka oksigen (O_2) yang terkandung dalam udara bereaksi dengan e_{aq}^- dan H^\bullet membentuk molekul radikal O_2^- dan HO_2^\bullet . Selanjutnya molekul radikal O_2^- dan HO_2^\bullet pelan-pelan bereaksi dengan H^+ membentuk hidrogen peroksida. Kemudian HO_2^\bullet dan H^+ juga mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{6+} dan hidrogen peroksida. Keseluruhan reaksi tersebut ditunjukkan sebagai berikut ^[11]:



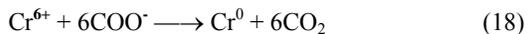
Hidrogen peroksida yang terbentuk dari reaksi (7), (11) dan (12) juga mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{6+} dengan reaksi sebagai berikut ^[11]



Radikal hidroksil yang terbentuk dari reaksi (7) dan (13) akan mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{6+} dengan reaksi sebagai berikut ^[4]



Untuk mencegah pengaruh negatif radikal bebas $\bullet\text{OH}$, HO_2^\bullet , dan H_2O_2 dimungkinkan dengan menggunakan *scavenger* ion formiat yang dapat mengkonversi radikal bebas ke dalam reaksi reduksi ^[14]. Radikal bebas H_2O_2 , $\bullet\text{OH}$, HO_2^\bullet dengan ion formiat masing-masing akan membentuk radikal ion COO^- yang dapat mereduksi Cr^{6+} menjadi logam netral Cr^0 dengan reaksi sebagai berikut ^[11]:



Berdasarkan reaksi tersebut di atas, maka untuk proses detoksifikasi Cr^{6+} dalam limbah cair penyamakan kulit dengan berkas elektron, maka ke dalam limbah cair perlu ditambahkan asam formiat sebagai *scavenger* untuk menjaga agar proses reduksi Cr^{3+} dan Cr^{6+} toksik oleh radikal bebas e_{aq}^- dan H^\bullet menjadi logam netral Cr^0 tidak toksik yang tetap stabil.

Keberadaan asam formiat (HCOOH) dalam campuran limbah cair pada bak ekualisasi dari industri penyamakan kulit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 justru memberikan keuntungan tersendiri, yaitu dapat mengurangi pemakaian asam formiat yang akan digunakan untuk mencegah pengaruh negatif radikal bebas $\bullet\text{OH}$, HO_2^\bullet , dan H_2O_2 yang dapat mereoksidasi Cr^0 menjadi Cr^{3+} dan Cr^{6+} kembali.

Karena radikal O_2^- dan HO_2^\bullet yang ada di udara akan mereoksidasi ion-ion yang sudah tereduksi dengan elektron terhidrasi (e_{aq}^-), maka udara dapat dihilangkan dari air (sebagai contoh dengan gelembung gas inert) sebelum atau selama iradiasi berkas elektron terhadap limbah cair sedang berlangsung ^[11,12].

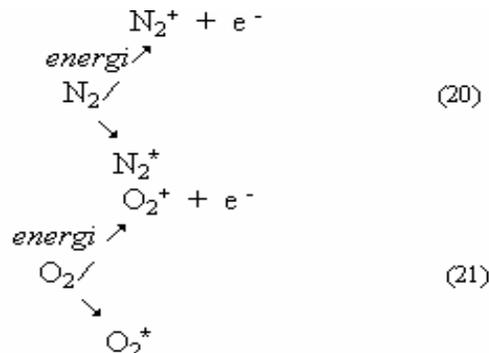
Detoksifikasi gas H_2S dalam Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit

Limbah cair dari proses produksi penyamakan kulit yang berasal dari proses pengerjaan basah (*beam house*) mengandung H_2S dari tahap proses pembuangan kapur (*deliming*), sisa H_2SO_4 dan sisa HCOOH dari tahap proses pembuangan kapur dan pengasaman (*pickling*). Terbentuknya gas H_2S yang bersifat toksik pada limbah cair industri penyamakan kulit antara lain berasal dari reaksi antara sisa Na_2SO_4 dari proses pengapuran dengan sisa H_2SO_4 ^[1]



Detoksifikasi gas H_2S dalam limbah cair industri penyamakan kulit oleh berkas elektron dapat mengadopsi dari mekanisme reaksi yang dikemukakan oleh Chmielewski (2005) dengan tahapan reaksi sebagai berikut ^[15]:

1. Transmisi energi O_2 dan N_2 dalam udara ($t_{\text{reaksi}} < 10^{-15}$ detik):

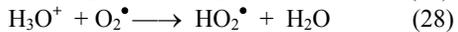
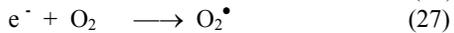
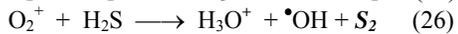
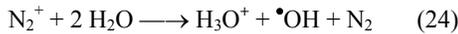


2. Dissosiasi molekuler ($10^{-15} < t_{\text{reaksi}} < 10^{-10}$ detik):

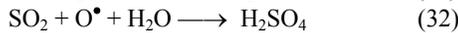
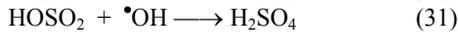
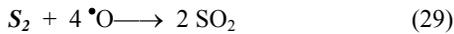




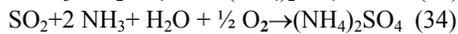
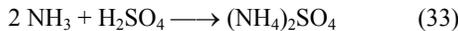
3. Reaksi ionik ($10^{-10} < t_{\text{reaksi}} < 10^{-5}$ detik) :



4. Reaksi radikal bebas ($10^{-5} < t_{\text{reaksi}} < 10^0$ detik)



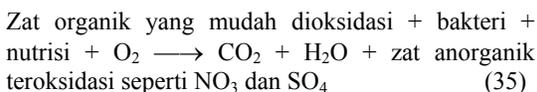
5. Reaksi penetralan ($10^{-5} < t_{\text{reaksi}} < 10^0$ detik) [5, 12, 15, 17] :



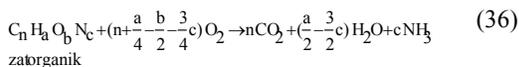
Dari reaksi di atas, maka hasil akhir detoksifikasi gas H₂S dalam limbah cair dari industri penyamakan kulit oleh berkas elektron adalah terbentuknya amonium sulfat : (NH₄)₂SO₄ non toksik yang terlarut dalam limbah cair pasca iradiasi.

Penurunan COD dalam Limbah Cair Menggunakan Berkas Elektron

Setiap bahan yang mudah dioksidasi yang ada dalam air limbah industri akan dioksidasi oleh biokimia (bakteri) atau proses kimia sehingga kandungan oksigen dalam air akan berkurang. Uji COD biasanya digunakan untuk mengukur banyaknya senyawa organik secara langsung dalam air. Dengan demikian angka COD merupakan ukuran pencemaran air oleh zat organik yang secara alamiah dapat dioksidasi dengan proses biokimia sehingga O₂ terlarut dalam air berkurang. Oksidasi zat organik melalui proses mikrobiologi pada dasarnya dapat dijelaskan dengan reaksi oksidasi biokimia yang bisa ditulis sebagai berikut [18] :



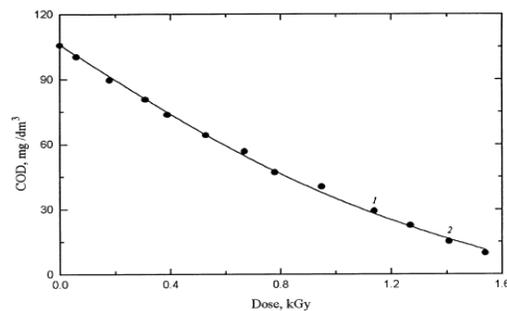
Banyaknya O₂ yang diperlukan untuk mengoksidasi zat organik dalam air dapat ditulis sebagai berikut [18] :



Dari reaksi (35) terlihat bahwa zat organik bermolekul besar dengan rantai hidrokarbon (C_nH_a)

yang panjang atau jumlah zat organik yang banyak diperlukan oksigen yang semakin banyak untuk proses oksidasi zat organik melalui proses biokimia. Dengan demikian apabila semakin besar kandungan zat organik dalam air limbah, maka oksigen terlarut dalam air limbah semakin berkurang.

Iradiasi berkas elektron pada air limbah dengan sistem aerasi dapat menurunkan COD. Hal ini disebabkan karena semakin banyak senyawa organik (C_nH_aO_bN_c) yang terdekomposisi oleh tambahan O₂ dari sistem aerasi. Disamping itu iradiasi berkas elektron terhadap air limbah dengan sistem aerasi menghasilkan molekul oksigen (O₂^{*}) dari radiolisis O₂ dalam udara seperti ditunjukkan dalam persamaan reaksi (2). Selanjutnya pada reaksi (23) molekul O₂^{*} akan terdisosiasi menjadi dua radikal bebas oksigen (2O^{*}) yang lebih reaktif daripada O₂ dalam udara. Dengan demikian dekomposisi senyawa organik dalam air limbah akan dipercepat dan diperbanyak oleh peran radikal bebas O^{*}. Semakin besar dekomposisi senyawa organik dalam air limbah oleh O₂ dalam udara dari sistem aerasi dan oleh O^{*} dari iradiasi O₂ dalam udara oleh berkas elektron menyebabkan kadar senyawa organik dalam air limbah menjadi berkurang karena terdekomposisi menjadi H₂O, gas NH₃ dan CO₂. Hal inilah yang menjadikan terjadinya penurunan nilai COD dalam air limbah oleh iradiasi berkas elektron seperti pada Tabel 1 [4, 11]. Pengaruh dosis radiasi terserap terhadap penurunan COD dalam *municipal wastewater* seperti ditunjukkan pada Gambar 4 [12].

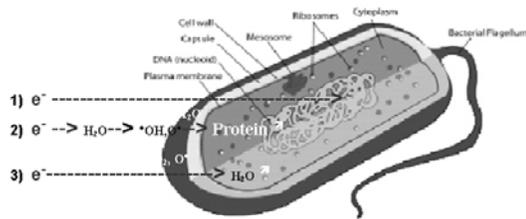


Gambar 4. Pengaruh dosis radiasi terserap terhadap penurunan nilai COD dalam air limbah selokan kota menggunakan berkas elektron [12]

Desinfeksi Mikroba (Bakteri)

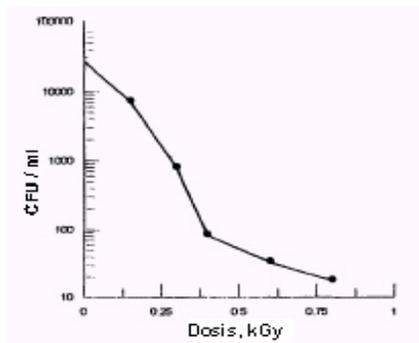
Radiasi pengion berinteraksi dengan bakteri dalam dua cara, yaitu secara langsung dan tidak langsung. Pada interaksi secara langsung, maka radiasi pengion (e⁻) berinteraksi dengan molekul kritis sel seperti deoksiribo nukleat acid (DNA) dan

protein yang ada dalam tubuh bakteri yang menyebabkan sel mikroba mati. Sedangkan interaksi secara tidak langsung, maka radiolisis air oleh berkas elektron yang menghasilkan radikal bebas yang sangat reaktif yang kemudian bereaksi dengan molekul air dan protein dalam sel bakteri sampai terjadi sel mikroba mati [19]. Efek letal radiasi berkas elektron menyebabkan kerusakan sel pada mikroorganismenya yang disebabkan oleh energi deposisi pada komponen kritis sel yang disebut DNA yang membawa informasi genetik sel dan membran sel dimana DNA menempel. Mikroba yang sensitif terhadap radiasi tidak dapat memperbaiki kerusakan *double strand break* yang menyebabkan mikroba mati. Disamping itu radikal bebas $\cdot\text{OH}$, H_2O_2 , O^\bullet yang terbentuk dari radiolisis air oleh berkas elektron akan mendegradasi protein dalam sel menjadi CO_2 , NH_3 , dan H_2O , maka protein sebagai nutrisi bagi kelangsungan hidup sel akan habis sehingga selnya mati [20]. Mekanisme sel bakteri mati ditunjukkan pada Gambar 5 [21]:

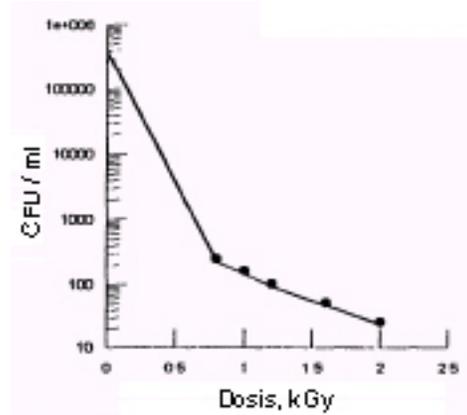


Gambar 5. Mekanisme kerusakan sel bakteri oleh berkas elektron [21]

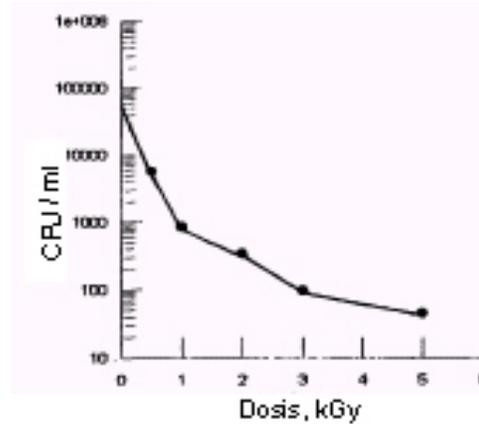
Dosis radiasi berpengaruh terhadap harapan hidup bakteri di dalam limbah. Sebagai contoh adalah pengaruh dosis radiasi terhadap unit pembentukan koloni bakteri dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) di dalam limbah cair effluen, limbah cair selokan, dan limbah lumpur adalah berbeda seperti yang ditunjukkan pada masing-masing Gambar 6 [22].



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Pengaruh dosis radiasi terhadap CFU bakteri coliform di dalam effluen limbah cair (a), air selokan perkotaan (b), limbah lumpur selokan (c) [22]

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Pikaev (1997, 2001) [11,12] dan Chmielewski (2004, 2005) [14,15,16], maka iradiasi berkas elektron pada limbah cair dari industri penyamakan kulit dapat dijelaskan dengan mekanisme sebagai berikut:

1. Unsur Cr^{6+} toksik dalam *municipal wastewater* direduksi oleh radikal bebas e^\bullet_{aq} dan H^\bullet menjadi Cr^0 tidak toksis [11, 12, 14],
2. Senyawa organik ($\text{C}_n\text{H}_a\text{O}_b\text{N}_c$) yang terlarut dalam *municipal wastewater* didekomposisi oleh oksidator radikal bebas O^\bullet menjadi H_2O , CO_2 dan NH_3 sehingga nilai COD menjadi turun seperti pada Tabel 1 dan Gambar 4 [11, 12, 18].

- Unsur H₂S toksik didegradasi oleh O₂ tereksitasi (O₂^{*}) menjadi SO₂ [15], selanjutnya SO₂ teroksidasi oleh 2 radikal bebas [•]OH menjadi H₂SO₄, atau SO₂ teroksidasi oleh radikal bebas O[•] yang terlarut dalam air menjadi H₂SO₄. Kemudian H₂SO₄ bereaksi dengan NH₃ dari hasil degradasi senyawa organik (C_nH_aO_bN_c) membentuk (NH₄)₂SO₄ [12, 15, 16, 17].
- Radikal bebas [•]OH, H₂O₂, O[•] mendesinfeksi bakteri patogen yang ada dalam *municipal wastewater* seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 6 [19, 20, 21].
- Senyawa organik seperti asam-asam amino dalam protein dapat didekomposisi oleh radikal bebas [•]OH dan O[•] menjadi beberapa rantai samping radikal aliphatic, kemudian akhir dari reaksi selanjutnya akan menghasilkan H₂O, CO₂ dan NH₃. Dengan demikian kadar senyawa organik menjadi berkurang yang ditandai dengan COD dalam *municipal wastewater* menjadi turun seperti ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 4 [11, 12, 18].

Dari metoda penelitian reduksi polutan kimia dan biologi pada *municipal wastewater* dan pembersihan gas buang dengan MBE yang telah dilakukan oleh Pikaev (1997, 2001) [11,12] dan Chmielewski (2004, 2005) [14,15,16], maka dengan menggunakan metoda tersebut dimungkinkan dapat diadopsi untuk penelitian detoksifikasi Cr⁶⁺ dan H₂S, desinfeksi bakteri patogen, penurunan COD dan senyawa organik dalam limbah cair dari industri penyamakan kulit di Indonesia dengan menggunakan MBE pada energi 0,35 MeV/5 mA yang ada di PTAPB – BATAN, Yogyakarta.

KESIMPULAN

- Berkas elektron secara umum dapat mereduksi COD dan mendekomposisi senyawa protein dalam limbah cair penyamakan kulit menjadi H₂O, CO₂, dan NH₃, dapat mereduksi Cr⁶⁺ toksik menjadi Cr⁰ tidak toksik, mengkonversi H₂S toksik menjadi SO₂ yang kemudian bereaksi dengan H₂O, O₂, dan NH₃ menjadi (NH₄)₂SO₄ tidak toksis, dapat mendesinfeksi bakteri patogen.
- Kandungan HCOOH dalam limbah cair penyamakan kulit memberikan manfaat karena berfungsi sebagai *scavenger* yang dibutuhkan untuk mencegah teroksidasinya Cr⁰ netral tidak toksis oleh oksidator radikal bebas [•]OH, H₂O₂, dan HO₂[•] menjadi Cr⁶⁺ toksis kembali.
- Terbentuknya (NH₄)₂SO₄ dari detoksifikasi H₂S dalam limbah cair penyamakan kulit dengan

- berkas elektron dapat memberikan keuntungan karena (NH₄)₂SO₄ diperlukan untuk pembuangan kapur (*deliming*) pada proses pengerjaan basah (*beam house process*).
- Pengolahan limbah cair dari industri penyamakan kulit dengan berkas elektron tidak menghasilkan limbah lumpur, sehingga akan mengurangi biaya pembuangan limbah lumpur ke *secure landfill* yang memenuhi syarat.
- Limbah cair industri penyamakan kulit yang telah diolah dengan berkas elektron dapat digunakan sebagai *make-up* air proses untuk proses pengerjaan basah pada proses produksi penyamakan kulit sehingga akan mengurangi biaya pengolahan air untuk kebutuhan air proses.
- Mesin berkas elektron yang ada di PTAPB – Batan Yogyakarta dengan energi 0,35 MeV / 5 mA dimungkinkan dapat digunakan untuk kegiatan litbang pengolahan limbah cair dari industri penyamakan kulit.

DAFTAR PUSTAKA

- ANONIM, Teknologi Pengendalian Dampak Lingkungan Industri Penyamakan Kulit, Buku Panduan, Bapedal, (1996).
- IRAWATI, Z., Teknologi dan Aplikasi Iradiasi Bahan Pangan Menggunakan Mesin Berkas Elektron dan Iradiator Gamma, Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Akselerator VIII, P3TM-Batan, Yogyakarta, (2005).
- DARSONO, Construction of Electron Beam Machine 350 keV/10 mA for Multipurpose Application of Thin Film at P3TM – BATAN, Proceedings of The FCNA 2003 Workshop on Application Electron Accelerator 18-22 August 2003, Kuala Lumpur, Malaysia, JAERI-Conf 2004-007, (2003).
- EIGER, ED., SMITH, BF., Environmental Science (A Study of Interrelation-ship), Mc Graw Hill, New York, (2002).
- CHMIELEWSKI, A.G., Electron Beam for Power Plant Flue Gas Treatment, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 3 – 29.
- GETOFF, N., Radiation Chemistry and the Environment, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12

- September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 121 – 131.
- [7] BEKBOLET, M., BALCIOGLU, I.A., GETOFF, N., Radiation Induced Decomposition of Chlorinated Benzaldehyde in Aqueous Solution, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 263 – 271.
- [8] HE, Y., WU, J., FANG, X., SONNTAG, C., Hydroxyl-Radical Induced Dechlorination of Pentachlorophenol in Water, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 273-280.
- [9] USEPA, Handbook on Advanced Oxidation Processes, EPA/625/R-98/004, (1998).
- [10] KDASI, A.A., IDRIS, A., SAED, K., GUAN, C.T., Treatment of Textile Wastewater by Advanced Oxidation Processes-A Review, *Global Nest : the Int. J.*, Vo. 6 No. 3, (2004), pp. 222 – 230.
- [11] PIKAEV, A.K., New Environmental Applications of Radiation Technology, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, IAEA-SM-350/51, (1997), pp. 243 – 254.
- [12] PIKAEV, A.K., PODZOROVA, E.A., BAKHTIN, O.M., LYSENKO, S.L., BELYSHEV, V.A., Electron Beam Technology for Purification of Municipal Wastewater in the Aerosol Flow, In : Use of Irradiation for Chemical and Microbial Decontamination of Water, Wastewater and Sludge, Final Report of a Co-ordinated Research Project, IAEA-Tecdoc-1225, (2001), pp. 45 – 55.
- [13] PIKAEV, A.K., KARTASHEVA, L.I., ZHESTKOVA, T.P., YURIK, T.K., CHULKOV, V.N., DIDENKO, O.A., KIM, D.K., KIM, Y., AND HAN, B., Removal of Heavy Metals from Water by Electron-Beam Treatment in the Presence of an Hydroxyl Radical Scavenger, *Mendeleviev Communications Electronic Version*, Issue 2, (1997), pp. 47 – 86
www.uonbi.ac.ke/acad_depts/chemistry/radiochemistry/heavymetals.pdf, 13 Juli 2006.
- [14] CHMIELEWSKI, A.G., Application of Ionizing Radiation to Environment Protection, In : Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, Proceedings of Technical Meeting Held in Sofia, Bulgaria, IAEA-Tecdoc-1473, (2004), pp. 11 – 24.
- [15] CHMIELEWSKI, A.G., TYMIŃSKI, B., PAWELEC, A., AND ZIMEK, Z., The Industrial Plant for Electron Beam Flue Gas Treatment – Experiences and Perspectives, Proceeding Second International Conference on Clean Coal Technologies for our Future. Instytut Chemii I Techniki Jadrowej, Dorodna 16, 03-195 Warszawa-Poland, (2005).
- [16] CHMIELEWSKI, A.G., Application of Ionizing Radiation to Environment Protection, Faculty of Process and Chemical Engineering, Warsaw University of Technology - Poland, *Nukleonika* 2005; 50 (Supplement 3):S17–S24, (2005).
- [17] DOUTSKINOV, N., Result of the Startup Operation of a Pilot Installation Electron Beam Flue Gas Treatment in the Maritsa East 2 Thermal Power Plant, In : Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, Proceedings of Technical Meeting Held in Sofia, Bulgaria, IAEA-Tecdoc-1473, (2004), pp. 35 – 43.
- [18] Chemical Oxygen Demand, http://en.wikipedia.org/wiki/Chemical_oxygen_demand, 13 Juli 2006.
- [19] SABHARWAL, S., SHAH, M.R., KUMAR, N., PATEL, J.B., Technical and Economic Aspects of Radiation Hygienization of Municipal Sewage Sludge Using Gamma Irradiation, In : Radiation Treatment of Gaseous and Liquid Effluents for Contaminant Removal, Proceedings of Technical Meeting Held in Sofia, Bulgaria, 7-10 September 2004, IAEA, Tecdoc-1473, (2004), pp. 111 – 118.
- [20] DARWIS, D., Aplikasi Mesin Berkas Elektron dalam Bidang Biomedical Polimer dan Farmasi, Diktat Materi Kuliah BATAN Accelerator School, P3TM – BATAN, (2004).
- [21] POERNOMO, H., WIDIYATI, C., Kajian Konversi Limbah Lumpur Penyamakan Kulit Menjadi Kompos Menggunakan Berkas Elektron, Prosiding Seminar Teknologi dan Aplikasi Akselerator IX, PTAPB – BATAN, Yogyakarta, (2006).
- [22] LAVALE, D.S., SHAH, M.R., RAWAT, K.P., GEORGE, J.R., Sewage Sludge Irradiators Batch and Continuous Flow, In : Radiation Technology Conservation of Environment, Proceedings of Symposium Held in Zakopane, Poland, 8 - 12 September 1997, (1997), pp. 289 – 301.