

PERANCANGAN UNIT KETEKNIKAN PROSES OKSIDASI BIOKIMIA UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH CAIR ORGANIK RADIOAKTIF

ZAINUS SALIMIN, ENDANG NURAENI, MIRAWATY, CERDAS TARIGAN

PTLR-BATAN

Kawasan Puspipstek Gd. 50 Serpong, Tangerang 15310

Abstrak

PERANCANGAN UNIT KETEKNIKAN PROSES OKSIDASI BIOKIMIA UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH CAIR ORGANIK RADIOAKTIF. Limbah cair organik radioaktif dari industri nuklir terdiri dari limbah deterjen dari pencucian pakaian kerja, limbah solven 30% TBP (tri n-butyl phosphate)-kerosin dari pemurnian ataupun pengambilan uranium dari gagal bahan bakar, limbah solven D2EHPA (di-2-ethyl hexyl phosphoric acid) dan TOPO (trioctyl phosphine oxide) dalam kerosin dari pemurnian asam fosfat. Limbah tersebut bersifat bahan berbahaya dan beracun (B3) yang korosif dengan pH rendah, BOD dan COD tinggi, dan juga bersifat radioaktif aktivitas rendah. Oksidasi biokimia adalah cara efektif detoksifikasi limbah B3 melalui penguraian zat organik menjadi CO₂ dan H₂O oleh bakteri dan secara bersamaan terjadi dekontaminasi melalui biosorpsi unsur radioaktif oleh bakteri. Hasilnya berupa sludge berkomposisi koloni bakteri yang mensorpsi unsur radioaktif, dan air beningan yang bebas zat radioaktif. Fasilitas pengolahan limbah radioaktif, PTLR tidak dapat untuk mengolah limbah tersebut, oleh karena itu diperlukan fasilitas pengolahan limbah organik. Telah dilakukan perancangan dan pembangunan unit keteknikan proses oksidasi biokimia untuk pengolahan limbah cair organik secara kontinyu kapasitas 1,6 l/j atau ekivalen dengan kapasitas 120 liter per batch dengan waktu 106 jam untuk limbah deterjen. Unit hasil rancangan terdiri dari 3 buah tangki penampung T-01, T-02 dan T-03 masing-masing kapasitas 100 liter, satu untuk penampung nutrisi dan dua lainnya penampung limbah cair, reaktor R-01 kapasitas 120 liter, penenap R-02 kapasitas 50 liter, tangki penampung T-04 dan T-05 masing-masing kapasitas 55 liter untuk sludge dan beningan. Larutan dalam R-01 diberi bakteri dan nutrisi serta diaerasi pada laju alir 28 l/menit dengan aerator P-02 dan P-03 sehingga terjadi oksidasi biokimia. Larutan dari R-01 dialirkan ke R-02 dimana sludge mengendap dibagian kerucut dan beningan naik ke bagian atas. Sebagian sludge disirkulasikan kembali dengan pompa P-01 menuju R-01.

Kata kunci: oksidasi biokimia, limbah radioaktif, limbah cair organik radioaktif

Abstract

DESIGN OF BIOCHEMICAL OXIDATION PROCESS ENGINEERING UNIT FOR TREATMENT OF ORGANIC RADIOACTIVE LIQUID WASTE. Organic radioactive liquid waste from nuclear industry consist of detergent waste from nuclear laundry, 30% TBP-kerosene solvent waste from purification or recovery of uranium from process failure of nuclear fuel fabrication, and solvent waste containing D2EHPA, TOPO, and kerosene from purification of phosphoric acid. The waste is dangerous and toxic matter having low pH, high COD and BOD, and also low radioactivity. Biochemical oxidation process is the effective methode for detoxification of organic waste and decontamination of radionuclide by biosorption. The result process are sludges and non radioactive supernatant. The existing treatment facilities radioactive waste in Serpong can not use for treatment of that's organics waste. Biochemical oxidation process engineering unit for continous treatment of organic radioactive liquid waste on the capacity of 1,6 l/h has been designed and constructed the equipment of process unit consist of storage tank of 100 l capacity for nutrition solution, 2 storage tanks of 100 l capacity per each for luquid waste, reactor oxidation of 120 l, settling tank of 50 l capacity storage tank of 55 l capacity for sludge, storage tank of 50 capacity for supernatant. Solution on the reactor R-01 are added by bacteria, nutrition and aeration using two difference aerators until biochemical

oxidation occurs. The sludge from reactor of R-01 are resirculated to the settling tank of R02 and on the its revers operation biological sludge will be settled, and supernatant will be overflow.

Keywords: biochemistry oxidation, radioactive waste, organic liquid radioactive waste

PENDAHULUAN

Kegiatan industri nuklir menimbulkan limbah cair organik radioaktif seperti limbah deterjen persil dari pencucian pakaian kerja radiasi, limbah solven 30% TBP (*tri-n-butyl phosphate*) dalam kerosin dari pemurnian atau pengambilan uranium dari gagalannya fabrikasi bahan bakar nuklir, limbah solven yang mengandung D2EHPA (*di-2-ethyl hexyl phosphoric acid*), dan TOPO (*trioctyl phosphine oxide*) dalam kerosin dari pemurnian asam fosfat. Deterjen persil adalah jenis deterjen berkadar buih rendah, merupakan senyawa *alkyl-aril sulfonat* yang mempunyai rumus $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_{10}\text{-CH}_2\text{-OSO}_3\text{Na}$ atau $\text{Na}^+\text{R}^+\text{SO}_3^-$. Tiap molekul deterjen dapat dianggap sebagai suatu rantai yang salah satu ujungnya bersifat suka air (hidrofil) dan ujung lainnya bersifat takut air (hidrofob). Gugus SO_3^- bersifat hidrofil dan rantai karbon R^+ bersifat hidrofob. Kotoran yang berupa lemak atau minyak menarik gugus hidrofob, sedangkan gugus hidrofil tertarik oleh air [1]. Dari operasi pencucian pakaian kerja radiasi yang dilakukan di IPLR, PTLR ditimbulkan 133,7 m³ limbah cair pertahun yang mengandung deterjen konsentrasi maksimum 1,496 g/l dengan nilai COD 338 ppm, BOD 189 ppm dan aktivitas minimal 10-6 Ci/m³. Limbah tersebut kemudian dicampur dengan limbah cair lain yang sejenis sehingga kadar deterjen sangat rendah, kemudian diolah melalui proses evaporasi dilanjutkan dengan proses sementasi konsentrat hasil evaporasi. Unsur radioaktif utama dalam limbah adalah Cs-137 yang berwaktu paruh 30 tahun. Evaporasi limbah deterjen tersebut menimbulkan buih, sehingga untuk mencegah distilat terkontaminasi unsur radioaktif dibutuhkan bahan anti buih. Biaya operasi evaporasi mahal karena diperlukan uap air pemanas yang dibangkitkan dari pembakaran minyak dalam boiler dan memerlukan bahan anti buih dan asam nitrat penghilang kerak [1].

TBP adalah senyawa organik yang mempunyai rumus $\text{C}_{12}\text{H}_{27}\text{PO}_4$, merupakan solven pengekstraksi uranium dari senyawa uranil nitrat [$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$] yang mempunyai

koefisien distribusi dan selektivitas yang tinggi, tahan radiasi, dan tahan asam. Dalam pemakaiannya TBP dilarutkan dalam kerosin *odorless* pada komposisi TBP dan kerosin masing-masing 30% dan 70% volume. Kerosin adalah senyawa hidrokarbon yang mempunyai jumlah atom C tiap molekulnya pada harga C₉ sampai dengan C₁₄, yang tersusun dari senyawa-senyawa alkana ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$) siklo alkana (metal siklo pentana, etil siklo heksana, dan lain-lain), hidrokarbon aromatik (benzen, toluen, dan lain-lain) yang mengandung nitrogen, belerang, oksigen dan organo logam [2]. Kerosin *odorless* adalah kerosin 99% yang mempunyai berat jenis 820 kg/m³ dan viskositas 0,3 cp, tidak berbau, yang komponen utamanya adalah senyawa alkana, kadar senyawa aromatik sangat rendah. Solven TBP-kerosin mempunyai nilai kalori pembakaran 10.000 kkal/kg, limbah solven tersebut diolah dengan insenerasi. Pada pembakaran TBP-kerosin timbul uap fosfat dalam gas hasil pembakaran yang merusak filter kantong (*bag filter*) dari inseneratornya. Untuk menghindari hal tersebut dilakukan penambahan garam kalsium formiat guna mengendapkan fosfat dalam bentuk kalsium fosfat yang kemudian terikat dalam abu pembakaran. Jadi pengolahan limbah TBP-kerosin memerlukan biaya operasi yang tinggi dan menimbulkan resiko kerusakan *bag filter* yang merupakan bagian penting dari *treatment* gas hasil pembakaran.

D2EHPA adalah senyawa organik yang mempunyai rumus $\text{C}_{16}\text{H}_{35}\text{PO}_4$ mempunyai densitas 960 kg/m³, nilai keasaman 171 mg KOH/g dan viskositas 40 m.Pa.dt, bila terkena mata dan kulit menyebabkan iritasi dan bila terhisap pernafasan menyebabkan keracunan. TOPO merupakan senyawa organik dengan rumus $\text{C}_{24}\text{H}_{51}\text{PO}$ mengandung H_3PO_4 kadar 0,2%, mempunyai densitas 880 kg/m³, titik didih 213 °C, bila terkena mata dan kulit menyebabkan iritasi, dan bila terhisap pernafasan menyebabkan keracunan. Campuran solven organik yang digunakan dalam proses pemurnian uranium mempunyai rasio D2EHPA, TOPO dan kerosin berturut-turut

4:1:16. Limbah solven tersebut mempunyai pH 4, COD dan BOD berturut-turut di atas 26.000 dan 1820 ppm, aktivitas alfa dan beta berturut-turut 0,002 Bq/l dan 0,01 Bq/l. Solven tersebut mempunyai kalori pembakaran lebih besar 10.000 kkal/kg, oleh karena itu limbah tersebut dapat dibakar dalam insenerator. Masalah yang timbul sama seperti yang dijumpai pada pembakaran solven TBP-kerosin.

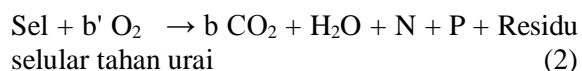
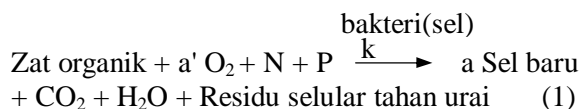
Limbah cair organik tersebut merupakan limbah bahan beracun dan berbahaya (B3) sekaligus juga sebagai limbah radioaktif. Proses oksidasi biokimia adalah cara pengolahan yang efektif untuk detoksifikasi limbah B3 melalui penguraian senyawa organik menjadi karbondioksida dan air oleh bakteri yang diaerasi dan diberi nutrisi. Secara bersamaan terjadi pula dekontaminasi zat radioaktif dari larutan melalui biosorpsi unsur radioaktif oleh bakteri. Hasilnya berupa *sludge* atau lumpur yang radioaktif dan non B3, beningan yang non B3, dan bebas kontaminasi zat radioaktif.

Di IPLR, PTLR fasilitas pengolahan tersebut belum ada, oleh karena itu perlu dirancang dan dibuat fasilitas proses oksidasi biokimia skala laboratorium untuk pengolahan limbah cair organik radioaktif dari industri nuklir. Pekerjaan diawali dengan penelitian untuk kerja prosesnya. Fasilitas tersebut disebut unit keteknikan proses. Telah dilakukan perancangan dan pembuatan unit keteknikan proses oksidasi biokimia untuk pengolahan limbah cair organik radioaktif dari industri nuklir.

TEORI

Prinsip Oksidasi Biokimia

Bila zat organik dihilangkan dari larutan melalui pengolahan secara proses biologi menggunakan bakteri sebagai mikroorganisme, terjadi dua fenomena dasar sebagai berikut: oksigen dikonsumsi oleh bakteri untuk memperoleh energi, dan massa sel baru terbentuk. Kebutuhan oksigen tersebut dipenuhi melalui penggelembungan udara kedalam larutan (proses aerasi). Mikroorganisme juga mengalami auto-oksidasi secara progresif dalam massa selulernya [4,5]. Reaksi tersebut digambarkan melalui persamaan sebagai berikut:



Yang perlu diperhatikan dalam perencanaan dan operasi fasilitas pengolahan secara biologi adalah jumlah oksigen dan nutrisi, dan jumlah lumpur biologi yang diperoleh. Lumpur biologi tersusun dari sel baru dan residu selular tahan urai. Logam berat dan unsur radioaktif dalam limbah akan terjerap pada lumpur biologi, sehingga terjadi dekontaminasi larutan. Besaran k dalam persamaan (1) adalah konstanta kecepatan reaksi yang merupakan fungsi kemampuan biodegradasi zat organik dalam limbah cair. Koefisien a' adalah fraksi zat organik yang dihilangkan melalui oksidasi menjadi hasil akhir berupa energi, dan koefisien a adalah fraksi zat organik yang dihilangkan melalui perubahan menjadi massa sel. Koefisien b adalah fraksi biomassa yang dapat terdegradasi melalui oksidasi perhari dan b' adalah oksigen yang dibutuhkan untuk oksidasi tersebut.

Bakteri yang digunakan harus dapat menyesuaikan dengan media air limbah yang diolah. Untuk air limbah yang lebih kompleks, penyesuaian media tersebut dapat memakan waktu sampai 6 minggu. Penghilangan *BOD* dari air limbah melalui lumpur biologi terjadi melalui 2 tahapan yaitu diawali penghilangan secara cepat zat tersuspensi, koloid dan *BOD* terlarut, diikuti dengan penghilangan lambat sisa *BOD* terlarut secara progresif.

Penghilangan *BOD* awal diselesaikan melalui satu atau lebih mekanisme berikut tergantung pada karakteristik fisika dan kimia dari zat organik [4,5]:

1. Penghilangan bahan tersuspensi termasuk logam berat dan unsur radioaktif melalui penangkapan dengan penjerapan pada flok biologi. Penghilangan ini berlangsung cepat dan tergantung pada tingkat pencampuran antara air limbah dan lumpur.
2. Penghilangan bahan koloid melalui penjerapan fisika kimia pada flok.
3. Penjerapan biologi zat organik terlarut oleh mikro-organisme, mungkin melalui pembentukan enzim oleh mikro-organisme, penarikan zat organik pada permukaan dinding bakteri atau sampai kedalam sel.

Penghilangan *BOD* terlarut berbanding langsung dengan konsentrasi lumpur yang ada, umur lumpur, dan karakteristik kimia zat organik terlarut. Tipe lumpur yang dihasilkan sangat mempengaruhi sifat penjerapan. Pada umumnya lumpur dari operasi *batch* atau *plug-flow* mempunyai sifat penjerapan yang lebih baik daripada yang didapatkan dari operasi pencampuran sempurna.

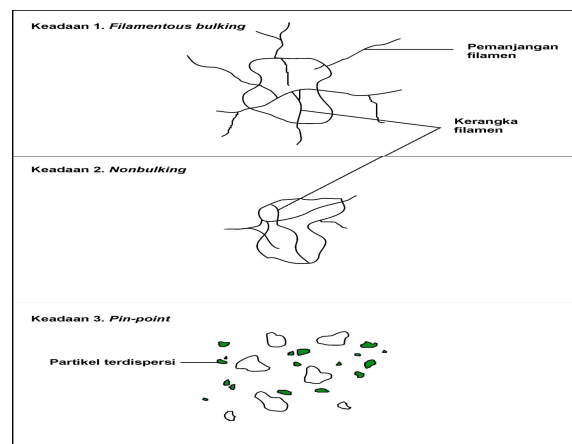
Proses Lumpur Aktif (*Activated Sludge*)

Proses lumpur aktif adalah salah satu proses yang paling banyak dipakai untuk pengolahan air limbah secara biologis. Di dalam sistem ini bakteri disuspensikan untuk terus bergerak dan tidak mengendap melalui adukan, arus resirkulasi, atau gerakan lain yang ditimbulkan oleh aerator [4,6]. Dengan demikian lumpur aktif merupakan bahan yang mengandung populasi bakteri aktif yang digunakan dalam pengolahan air limbah. Pada proses kontinyu, lumpur aktif yang terbawa bersama air limbah hasil pengolahan dipisahkan dalam tangki pengeapan dan sebagian lumpur aktifnya disirkulasikan kembali ke tangki aerasi, sedangkan bagian lainnya diambil sebagai hasil pekatan. Beningan yang dihasilkan proses lumpur aktif relatif jernih dan memenuhi syarat untuk dibuang.

Salah satu faktor penting untuk unjuk kerja proses lumpur aktif adalah mekanisme flokulasi yang efektif, diikuti dengan pengeapan dan pemampatan yang cepat. McKinney menghubungkan flokulasi dengan rasio makanan (F) terhadap mikro-organisme (M) atau nilai F/M, dan menunjukkan bahwa mikro-organisme (bakteri) secara normal ada di dalam lumpur aktif yang menggumpal dengan cepat pada kondisi kelaparan [4]. Lebih lanjut telah ditunjukkan bahwa flokulasi diakibatkan oleh pembentukan lapisan lumpur polisakarida yang lengket dimana mikro-organisme menempel. *Flagela* juga terjerat dalam bahan lumpur tersebut. Organisme bentuk filamen terdapat di dalam kebanyakan lumpur aktif kecuali pada limbah dari industri kimia dan petrokimia. Palm, dkk telah mengidentifikasi tiga macam lumpur aktif yaitu *filamentous bulking*, *non-bulking*, dan *pin-point* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 [4,6]. Lumpur *non-bulking* dihasilkan dari operasi *plug-flow* atau *selector plant configuration*, atau dari air limbah organik yang kompleks. Lumpur *pin-*

point dihasilkan dari operasi dengan nisbah F/M yang rendah pada umur lumpur yang lama. Lumpur aktif jenis *filamentous bulking* yang mudah menyebabkan tersumbatnya sistem resirkulasi lumpur dan peralatan aerasi, dihasilkan dari air limbah yang mengandung glukosa, sakarosa, laktosa dan bahan sejenis. Kekurangan oksigen terlarut dalam air limbah di sistem pengolahan biologis menyebabkan terbentuknya lumpur *filamentous bulking*, pada konsentrasi oksigen kurang dari 0,1 mg/L terbentuklah filamen tipis 1-4 μm . Untuk proses pengolahan secara biologis aerob yang bagus, hubungan antara konsentrasi oksigen terlarut dalam limbah dan nisbah F/M dikembangkan oleh Palm, dkk (1980) seperti ditunjukkan pada Gambar 2 [4,6].

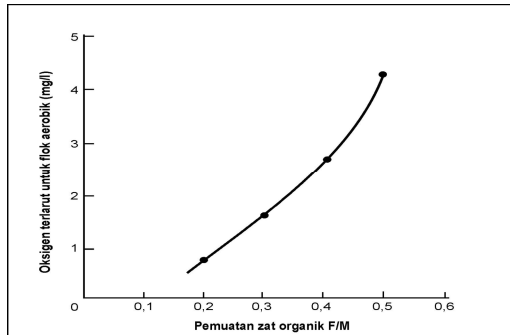
Chudoba, dkk (1985) menunjukkan bahwa kecepatan pertumbuhan organisme sangat dipengaruhi oleh konsentrasi bahan organik dan rasio F/M [4,6]. Pada bahan terdegradasi konsentrasi rendah, pertumbuhan lumpur cenderung berbentuk filamen. Hal ini menjelaskan mengapa pada sistem campuran dengan konsentrasi bahan organik rendah cenderung memberikan pertumbuhan lumpur bentuk filamen.



Gambar 1. Tipe Lumpur aktif yang dapat terbentuk dalam proses pengolahan limbah organik dengan proses oksidasi biokimia

Pada konsentrasi bahan organik yang tinggi, flok yang terbentuk menarik bahan organik dari larutan pada kecepatan yang tinggi dibanding dengan penarikan filamen, penarikan bahan organik oleh flok tersebut mendominasi proses yang terjadi. Oleh karena itu untuk memperoleh gradien konsentrasi bahan organik yang tinggi digunakan sistem operasi

pengolahan biologis secara *plug-flow*, pemakaian *selector* atau *contactor* [6].



Gambar 2. Hubungan antara konsentrasi oksigen terlarut dalam limbah dan misbah F/M (F=nilai BOD dalam larutan dan M=jumlah mikroorganisme yang diperlukan) [4].

Kontrol Pencemaran Logam Berat Oleh Mikroba

Mikroorganisme dapat mengakumulasi logam berat dan unsur radioaktif dari lingkungan eksternalnya. Jumlah zat yang terakumulasi bervariasi, mekanisme akumulasinya dapat terjadi melalui proses fisika, kimia, dan biologi, termasuk adsorpsi, presipitasi, pembentukan kompleks dan fenomena transfer massa. Sel hidup dan mati yang dihasilkan sel mikroba seperti penyusun dinding sel, pigmen, polisakarida, logam yang berikatan dengan protein, dan residu selular tahan urai, mampu menghilangkan logam dan unsur radioaktif dalam larutan [6]. Beberapa contoh akumulasi logam berat dan unsur radioaktif oleh mikroba ditunjukkan pada Tabel 1 [5,6].

Penghilangan logam berat dan unsur radioaktif dari larutan dengan bahan biologi, khususnya melalui interaksi yang tidak langsung secara fisika-kimia biasa disebut bioabsorpsi. Pada dasarnya semua bahan biologi mempunyai sifat bioabsorpsi, tidak hanya mikroba saja yang memiliki sifat tersebut. Bioabsorpsi dan fenomena yang terkait merupakan proses yang penting karena penghilangan racun kuat, logam berat, dan unsur radioaktif dari limbah cair dapat menghasilkan detoksifikasi larutan, sehingga pelepasan buangan cair ke lingkungan dapat berlangsung secara aman [5,6].

Tabel 1. Beberapa contoh akumulasi logam berat dan unsur radioaktif oleh Mikroba [5,6]

Organisme	Unsur	Uptake % bobot kering
1. Bakteri		
<i>Streptococcus sp.</i>	U	2-14
<i>S. viridochromogenes</i>	U	30
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Ag	25
<i>Zooglea sp.</i>	Cd	4-9
	Co	25
	Cu	34
	Ni	13
	U	44
<i>Citrobacter sp.</i>	Pb	34-40
	Cd	40
	U	90
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	U	15
Kultur campuran	Cu	30
Kultur campuran	Ag	32
<i>Bacillus sp.</i>	Pb	60,1
	Cu	15,2
	Zn	13,7
	Cd	21,4
	Ag	8,6
2. Ganggang		
<i>Chlorella vulgaris</i>	Au	10
<i>Chlorella regularis</i>	U	15
<i>C. regularis</i>	U	0,4
	Mn	0,8
3. Jamur		
<i>Phoma sp.</i>	Ag	2
<i>Penicillium sp.</i>	U	8-17
<i>Rhizopus arrhizus</i>	Cu	1,6
	Cd	3
	Pb	10,4
	U	19,5
	Th	11,6-18,5
	Ag	5,4
	Hg	5,6
<i>Aspergillus niger</i>	Th	18,5
	U	21,5
4. Ragi		
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	U	10-15
	Th	12
	Zn	0,5
Ragi (14 strains)	Ag	0,05-1

Kebutuhan Nutrisi pada Proses Oksidasi Biokimia

Beberapa unsur mineral sangat diperlukan sebagai nutrisi untuk metabolisme

zat organik oleh mikroorganisme, kecuali nitrogen dan fosfor yang biasanya telah ada dalam jumlah yang cukup dalam air. Nutrisi yang kebutuhannya sedikit untuk oksidasi biokimia diberikan pada Tabel 2 [4]. Kotoran dalam air limbah memberikan kesetimbangan makanan mikroba, tetapi banyak air limbah industri (gula, kertas, pulp, dan lain-lain) tidak mengandung cukup nitrogen dan fosfor, dan memerlukan penambahan sebagai suplemen nutrisi.

Kuantitas nitrogen dan fosfor yang diperlukan untuk penghilangan *BOD* yang efektif dan terjadinya sintesis mikroba telah diteliti oleh Melmer, et.al 1951, sebesar 4,3 kgN/100 kg *BOD* dan 0,6 kg P/100 kg *BOD*, yang diturunkan dari beberapa pengolahan air limbah industri yang memerlukan nutrisi nitrogen dan fosfor. Di dalam prakteknya nutrisi diberikan pada kuantitas *BOD* : N : P = 100 : 5 : 1 [4,6].

Tidak semua senyawa nitrogen organik dapat untuk sintesis mikroba. Nitrogen biasanya ditambahkan dalam bentuk urea, senyawa nitrogen sebelum digunakan harus dikonversi lebih dahulu ke bentuk amonia. Nitrit, nitrat dan sekitar 75% senyawa nitrogen organik juga dapat digunakan untuk sintesis mikroba, fosfor dapat diberikan sebagai asam fosfat, *tri super phosphate (TSP)* biasanya digunakan sebagai sumber nutrisi fosfor. Dalam percobaan yang dilakukan digunakan nutrisi urea sebagai sumber N dan *TSP* sebagai sumber P, dengan perbandingan *BOD* : N:P = 100 :5:1.

Daya Pemompaan

Daya pemompaan terdiri dari liquid horsepower (horsepower cairan atau daya cairan), Brake horsepower (BHP), dan Driver horsepower (Horsepower penggerak).

Liquid horsepower adalah tenaga yang harus diberikan kepada cairan, nilai LHP tersebut tergantung pada jarak transfer cairan, tinggi atau elevasi yang diinginkan, beda tekanan cairan pada titik masuk ke sistem dan titik keluar dari system, kecepatan alir cairan yang diinginkan, dan gangguan aliran sepanjang lintasan yang dinyatakan sebagai kehilangan tenaga karena gesekan dan tumbukan. Jarak transfer dan elevasi yang diinginkan diperoleh dari layout (tata letak) peralatan, dan beda tekanan diperoleh dari neraca energi.

Tabel 2. Nutrisi yang dibutuhkan untuk oksidasi biokimia dalam jumlah yang kecil (bentuk ion) [4]

No	Jenis Nutrisi	Kadar mg/mg <i>BOD</i>
1	Mn	10x10 ⁻⁵
2	Cu	14,6x10 ⁻⁵
3	Zn	16x10 ⁻⁵
4	Mo	43x10 ⁻⁵
5	Se	14x10 ⁻¹⁰
6	Mg	30x10 ⁻⁴
7	Co	13x10 ⁻⁵
8	Ca	62x10 ⁻⁴
9	Na	5x10 ⁻⁵
10	K	45x10 ⁻⁴
11	Fe	12x10 ⁻³
12	CO ₃	27x10 ⁻⁴

Rumus untuk penentuan LHP diperoleh dari persamaan Bernoulli [7,8] sebagai berikut:

$$LHP = -W_s = \left[\frac{\Delta P}{\rho} + \Delta Z + \frac{\Delta V^2}{2g} + F \right] x \left[\frac{m}{550} \right] \quad (3)$$

dengan: $\Delta P/\rho$ = Head tekanan, ΔZ = head statis, $\Delta V^2/2g$ = Head kecepatan, F = kehilangan head karena friksi, semua head dalam *ft* atau *ft.lbf/lbm*, M = laju alir massa (*lb/s*).

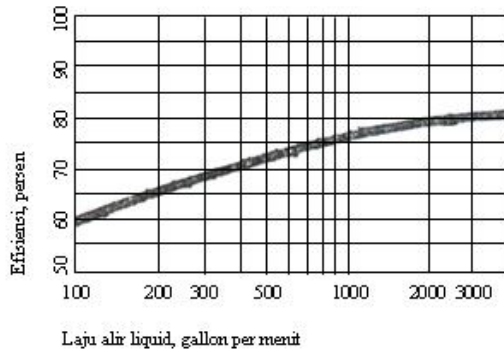
Brake horsepower adalah energi yang harus diberikan kepada pompa dalam kaitannya dengan pemutaran impeller untuk memperoleh gaya sentrifugal. Rasio LHP terhadap BHP yang dinyatakan sebagai persentase adalah merupakan efisiensi pompa (*EFF*).

$$EFF = \frac{LHP}{BHP} \times 100\% \quad (4)$$

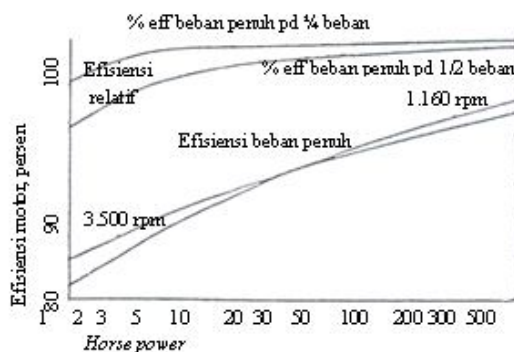
Gambar. 3 menunjukkan efisiensi pompa sentrifugal. Dengan demikian maka nilai BHP adalah :

$$BHP = \frac{LHP}{EFF} \quad (5)$$

Drive horsepower (DHP) (horsepower penggerak) adalah tenaga penggerak poros pompa, nilainya harus lebih besar dari input brake horsepower terhitung (atau dari pembacaan kurva pompa).



Gambar 3. Efisiensi Pompa Sentrifugal



Gambar 4. Efisiensi motor

Kehilangan tenaga mekanik pada kopleing, V/belt, dan bagian-bagian tranmisi yang lain harus diperhitungkan agar output tenaga penggerak (Driver horsepower) cukup untuk menjalankan pompa. Rasio *BHP* terhadap *DHP* merupakan efisiensi motor (*EFM*).

$$EFM = \frac{BHP}{DHP} \quad (6)$$

Gambar 4 menunjukkan efisiensi motor. Dengan demikian:

$$DHP = \frac{BHP}{EFM} \quad (7)$$

Diameter Ekonomis Perpipaan

Perhitungan diameter ekonomis dilakukan dengan persamaan sebagai berikut [9]:

Untuk aliran turbulen dengan bilangan Reynold $Re > 2100$ nilai diameter ekonomisnya adalah :

$$Di = 3,9q_f^{0,45} \rho^{0,3} \quad (8)$$

Untuk aliran laminer dengan bilangan $Re < 2100$ nilai diameter ekonomisnya adalah :

$$Di = 3,0q_f^{0,36} \times \mu_c^{0,18} \quad (9)$$

dengan : *Di* = diameter ekonomis (in), *q_f* = debit aliran (*ft³/s*), *ρ* = densitas cairan (*lb/ft³*) dan *μ* = kekentalan cairan (*cp*).

Perhitungan Perancangan

Unit keteknikan proses oksidasi biokimia yang dirancang terdiri dari tangki penampung limbah, tangki penampung nutrisi, reaktor oksidasi, tangki penampung pengenap Lumpur dan perpipaan sirkulasi larutan.

Perhitungan Dimensi Reaktor

Pada kondisi operasi normal pencucian pakaian kerja radiasi, jumlah limbah detergen yang ditimbulkan pertahun sebanyak 133,7 m³[1]. Dalam penentuan kapasitas unit keteknikan proses oksidasi biokimia untuk pengolahan limbah cair organik radioaktif dari industri nuklir, sebagai basis hitungan dianggap 8% dari limbah detergen diolah dengan unit keteknikan hasil rancangan dan unit proses dioperasikan 280 hari per tahun. Asumsi nilai 8% diambil berdasarkan kondisi terakhir saat ini bahwa unit pencucian pakaian kerja radiasi IPLR, PTLR hanya beroperasi untuk layanan internal PTLR.

Jumlah limbah yang akan diolah menggunakan unit keteknikan proses tersebut sebanyak:

$$\frac{133,7m^3 / th \times 1000L / m^3}{280hari / th \times 24j / hari} \times 8\% = 1,6 L/jam$$

Berdasarkan penelitian terdahulu waktu tinggal limbah dalam reaktor adalah 106 jam [1], maka volume larutan dalam reaktor = 1,6 L/j x 106 j = 170 liter.

Volume sebesar 170 L tersebut merupakan volume larutan dalam reaktor oksidasi biokimia R-01 dan pengenap R-02. Volume larutan dalam R-01 dan R-02 ditetapkan masing-masing sebesar 120 l dan 50 l.

Perhitungan Dimensi R-01

Ukuran reaktor R-01 ditetapkan: p (panjang) = 80 cm dan l (lebar) = 40 cm

Bila tinggi cairan adalah t maka :

Volume larutan dalam R-01 = $120 \text{ dm}^3 = 120.000 \text{ cm}^3 = 80 \times 40 \times t$

Maka: $t = 37,5 \text{ cm}$

Tinggi R-01 ditetapkan sebesar 40 cm

Perhitungan Dimensi Pengecap R-02

Volume larutan dalam R-02 = 50 L

Pengecap R-02 bagian dasarnya diambil bentuk kerucut dengan $t \tan \theta = \frac{t_k}{1/2p} = \frac{1}{3}$

dengan: t_k = tinggi bagian kerucut dan p = lebar pengecap bagian atas.

Maka : $t_k = 1/6 p$

Ukuran pengecap R-02 ditetapkan sebagai berikut:

$p = 60 \text{ cm}$, $l = 30 \text{ cm}$ dan tinggi = $t + t_k$. Dalam hal ini $t_k = 1/6 (60) = 10 \text{ cm}$.

Volume total = volume bagian atas + volume bagian kerucut.

Volume bagian atas = $60 \times 30 \times t \text{ (cm}^3\text{)}$

Volume bagian kerucut = $\frac{1}{3} \times 60 \times 30 \times 10 \text{ (cm}^3\text{)}$

$50.000 \text{ cm}^3 = (60 \times 30 \times t) \text{ (cm}^3\text{)} + (\frac{1}{3} \times 60 \times 30 \times 10) \text{ (cm}^3\text{)}$

Maka: $t = 24,5 \text{ cm}$

Tinggi bagian atas diambil 27 cm

Perhitungan Diameter Ekonomis Perpipaian Untuk Resirkulasi Cairan

Sesuai Gambar 1, terdapat 3 macam lumpur aktif yaitu filamentous bulking, non-bulking, dan bulking yang terbentuk pada sistem yang kekurangan oksigen atau pada sistem campuran, menyebabkan operasi pengolahan secara biologi menjadi terhambat karena penyumbatan system sirkulasi. Lumpur aktif jenis non-bulking dihasilkan dari operasi *plug-flow*, *batch* dan *selector plant configuration*. Dalam percobaan ini dipilih operasi *batch* yang dilengkapi konfigurasi perpipaian sehingga bisa juga dioperasikan kontiyu, dengan resirkulasi larutan dari R-02 ke R-01 dan sebaliknya, dan pemberian aerasi. Hal tersebut dimaksudkan agar tidak terjadi kekurangan oksigen dalam larutan dan lumpur aktif jenis filamentous bulking tidak terbentuk, yang diharapkan terbentuk adalah lumpur jenis

non-bulking. Resirkulasi larutan dilakukan dengan pompa yang berkapasitas 4000 L/jam.

$$q_f = 4000 \text{ L / jam} = \frac{4000 \times \frac{1}{28,316} \text{ ft}^3 / \text{L}}{3600 \text{ dt}} = 0,0392 \text{ ft}^3 / \text{dt}$$

Sifat larutan detergen dianggap sama dengan sifat air yang mempunyai densitas $\rho = 62,4 \text{ L/ft}^3$ dan kekentalan $\mu = 0,85 \text{ Cp} = 0,85 \text{ g/ms}$.

Asumsi jenis alirannya adalah turbulen, maka :

$$D_i = 3,9 \times q_f^{0,45} \times \rho^{0,30}$$

$$D_i = 3,9 \times (0,0392)^{0,45} \times (62,4)^{0,30}$$

$$D_i = 0,48 \text{ in} \approx 0,5 \text{ in}$$

Jadi diameter bagian dalam pipa resirkulasi adalah 0,5 in atau 1,27 cm. Pengecekan apakah asumsi aliran turbulensi betul atau tidak :

$$q_f = 4000 \text{ L / jam} = 1111,11 \text{ cm}^3 / \text{dt}$$

$$q_f = V \times A, \text{ dengan : } V = \text{kecepatan alir}$$

linier dan $A = \text{Luas penampang aliran}$

$$V = \frac{q_f}{A}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \times (1,27)^2}{4} = 1,6129 \text{ cm}^2$$

$$V = \frac{1111,11 \text{ cm}^3 / \text{dt}}{1,6129 \text{ cm}^2} = 688 \text{ cm / dt}$$

Bilangan Reynold (Re)

$$\text{Re} = \frac{\rho \times V \times D}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{1 \text{ g / cm}^3 \times 688 \text{ cm / dt} \times 1,27 \text{ cm}}{0,85 \frac{\text{g}}{100 \text{ cm} \cdot \text{dt}}} = 102.795,3$$

Jadi, jika nilai $\text{Re} > 2100$, asumsi aliran turbulensi benar.

Perhitungan Tenaga Pemompaan Resirkulasi Larutan

Perhitungan tenaga pemompaan sesuai Pers (3) sebagai berikut:

$$\text{LHP} = -W_s = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta Z$$

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \text{head tekanan} = \frac{P_2 - P_1}{\rho}$$

Tekanan di titik 1 pada posisi hisapan cairan pompa P-01 pada pengecap R-02 (P_1) mempunyai harga yang sama dengan tekanan di titik-titik pada posisi pelepasan cairan ke

reaktor R-01 (P_2), sehingga $\frac{\Delta P}{\rho}$ sama dengan

nol.

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

Kecepatan di titik 1 (v_1) bernilai nol dan kecepatan di titik 2 (v_2) berharga 688 cm/s, maka

$$\frac{\Delta v^2}{2g} = \frac{688^2 \text{ cm}^2 / \text{dt}^2}{2 \cdot 9,8 \text{ m} / \text{dt}^2 \times 100 \text{ cm} / \text{m}} = 241,5 \text{ cm}$$

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

dengan:

Z_1 = ketinggian lokasi titik 1, berharga nol karena sebagai bidang referensi

Z_2 = ketinggian lokasi titik 2, berharga 30 cm terhadap bidang referensi

$$\Delta Z = 30 \text{ cm}$$

F = tenaga yang hilang karena friksi, merupakan fungsi dari :

$$F = \frac{fLv^2}{2 \cdot g_c \cdot D}$$

dengan f = faktor friksi, L = panjang pipa = 60 cm dan g_c = tetapan grafitasi

$$\text{Jadi : } F = \frac{fLv^2}{2 \cdot g_c \cdot D}$$

Re = 102,795 → dari Fig 125 Brown [8] untuk *smooth pipe* $f = 0.018$

$$F = \frac{0,018(60 \text{ cm})(688)^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2}}{2(9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(1,27 \text{ cm})(100 \frac{\text{cm}}{\text{m}})}$$

$$F = 205 \text{ cm}$$

Tenaga pemompaan resirkulasi $LHP = -Ws$

$$LHP = -Ws = (241,5 + 30 + 205)$$

$$-Ws = 476 \text{ cm}$$

$$-Ws = \frac{476 \text{ cm}}{30,48 \text{ cm} / \text{ft}^2}$$

$$-Ws = 15,62 \text{ ft}$$

$$\text{Laju alir massa} = 0,0392 \text{ ft}^3/\text{s} \times 62,4 \text{ lb}/\text{ft}^3 = 2,44608 \text{ lb}/\text{s}$$

$$LHP = 15,62 \text{ ft} \cdot \text{lb}/\text{lb} \times 2,45 \text{ lb}/\text{s}$$

$$= 38,2 \text{ ft} \cdot \text{lb}/\text{s}$$

$$\text{ft} \cdot \text{lb}/\text{s} = 0,0013558 \text{ KW}$$

$$= 1,3558 \text{ W}$$

$$\text{Maka : } LHP = 52 \text{ W}$$

Dari Gambar 4 diperoleh efisiensi pompa = 0,60

Maka:

$$BHP = \frac{LHP}{0,60} = 86,67 \text{ W}$$

Dari Gambar 4 diperoleh efisiensi motor 0,92

Maka:

$$DHP = \frac{86,67}{0,92} = 94,2 \text{ Watt}$$

Dipakai pompa dengan tenaga 95 Watt.

Penentuan Kapasitas Tangki-Tangki Penampung Nutrisi, Limbah, Beningan dan Lumpur

Tangki penampung nutrisi T-01, tangki penampung limbah cair T-02 dan T-03 direncanakan untuk menampung 100 l larutan. Tangki-tangki tersebut dipilih bentuk silinder tegak sesuai yang ada di pasaran, mempunyai diameter 48,9 cm dan tinggi 88,5 cm. Tangki penampung beningan T-04 dan tangki penampung Lumpur T-05 direncanakan untuk menampung 55 l larutan. Tangki T-04 dan T-05 dipilih bentuk akuarium, sesuai yang ada di pasaran, mempunyai bentuk kotak persegi panjang ukuran 60 cm x 30cm x 35cm. Gambar 5 menunjukkan unit proses oksidasi biokimia hasil rancangan.

Perhitungan Jumlah Bakteri

Pengukuran nilai oksigen terlarut (DO) yang digunakan telah dilakukan pada deterjen yang telah diaerasi dalam unit proses pengolahan secara biologis dengan alat *Water-Checker*, diperoleh nilai DO 5,4 ppm. Berdasarkan buku *Industrial Water Pollution Control* karangan W. Wesley Eckenfelder Figure 6-15 referensi 4 atau sesuai dengan Gambar 2 didapat $\frac{F}{M} = 0,51$ dengan F adalah

makanan bakteri yang merupakan nilai BOD larutan, dan M adalah jumlah bakteri yang digunakan. Bakteri yang digunakan adalah jenis campuran bakteri mutan yang terdiri dari *bacillus sp*, *pseudomonas sp*, *arthrobacter sp*

dan *aeromonas sp* yang mempunyai harga densitas larutan $\rho = 0,996$ g/ml.

Nilai BOD pada limbah cair kadar deterjen 1,496 g/l adalah 185,90 ppm:

$$\begin{aligned} F &= 185,90 \text{ mg/L} \times \text{volume rektor} \\ &= 185,90 \text{ mg/L} \times 170 \text{ L} \\ &= 31.603 \text{ mg} \end{aligned}$$

$$\frac{F}{M} = 0,51$$

$$M = \frac{F}{0,51} = 61,966 \text{ mg}$$

Densitas larutan bakteri = 0,966 g/ml, maka :

$$\begin{aligned} M &= \frac{61,966 \text{ ml}}{0,996} \\ &= 62,215 \text{ ml} \end{aligned}$$

Digunakan 72 ml bakteri untuk proses oksidasi biokimia limbah cair deterjen kadar 1,496 g/L yang bervolume 170 L. Hal tersebut didasarkan bahwa operasi yang dijalankan adalah jenis proses lumpur aktif yang mengandung populasi bakteri aktif, koloni bakteri yang telah tumbuh diresirkulasikan kembali, dan regenerasi dan pertumbuhan bakteri dalam jutaan koloni terjadi.

Perhitungan Jumlah Nutrisi yang Diberikan

Nutrisi dibuat dengan rasio BOD:N:P = 100:5:1 ppm. Nilai BOD = 185,90 ppm, maka:

$$\text{BOD:N:P} = 185,90 : 9,295 : 1,859 \text{ ppm}$$

Digunakan urea dengan kadar 46%, maka jumlah urea yang digunakan :

$$100/46 \times 9,295 \text{ ppm} = 20,2065 \text{ mg urea/l larutan.}$$



Gambar 5. Proses oksidasi biokimia hasil rancangan

Untuk 18,6 L larutan, jumlah urea yang harus ditambahkan = $170 \text{ L} \times 20,2065 \text{ mg/L} = 3435 \text{ mg} = 3,4 \text{ g}$. Digunakan 3,4 g pupuk urea dan dilarutkan dalam 18,6L limbah cair kadar deterjen 1,496 g/L aktivitas $\text{Cs-137.10}^{-6} \text{ Ci/m}^3$. Digunakan pupuk TSP 46%, maka jumlah pupuk TSP yang harus ditambahkan :

$$170 \times 4,0413 \text{ mg/L} = 687 \text{ mg} = 0,7 \text{ g.}$$

Digunakan 0,7 g pupuk TSP dan dilarutkan dalam 170 L limbah cair kadar deterjen 1,496 g/L aktivitas $\text{Cs-137.10}^{-6} \text{ Ci/m}^3$. Data jumlah bakteri SGB 102 atau SGB 104 dan nutrisi minimal untuk proses oksidasi biokimia limbah deterjen sebagai fungsi konsentrasi deterjen dapat dilihat pada Tabel 2.

Perhitungan Debit Udara Aerasi

Nilai COD dalam larutan bernilai 338 ppm.

Densitas oksigen = $\rho_{O_2} = 1,4289 \text{ g/L}$ (Tabel 3-30 Referensi 10).

Jumlah oksigen yang diperlukan:

$$\begin{aligned} &= 338 \text{ mg/L} \times 170 \text{ L} \\ &= 57.460 \text{ mg} \\ &= 57,460 \text{ g/L}, 4289 \text{ g/L} \\ &= 40,21 \text{ L} \end{aligned}$$

Operasi aerasi proses oksidasi biokimia dilakukan melalui penggunaan udara yang digelembungkan dalam larutan. Dalam udara terdapat 79% N_2 dan 21% O_2 , maka udara yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} &= \frac{79}{21} \times 40,21 \text{ L} \\ &= 151,27 \text{ L} \end{aligned}$$

Laju alir udara yang harus diberikan:

$$\begin{aligned} &= \frac{151,27 \text{ L/j}}{106} \\ &= 1,427 \text{ L/j} \end{aligned}$$

Agar pemberian oksigen aman, tidak terjadi kekurangan oksigen dalam larutan sehingga lumpur aktif jenis *filamentous bulking* tidak terbentuk yang diharapkan terbentuk *non-bulking*, digunakan 2 buah aerator yang masing-masing mempunyai debit 14 L/j atau pemberian aerasi pada debit 28 L/j.

KESIMPULAN

Dalam proses oksidasi biokimia 3 jenis lumpur aktif dapat terbentuk, lumpur jenis *non-bulking* merupakan pilihan terbaik karena tidak ada resiko penyumbatan pipa resirkulasi dan biosorpsi unsur radioaktif menghasilkan dekontaminasi larutan yang lebih baik. Lumpur

aktif *filamentous bulking* dan *non-bulking* dihindari pembentukannya karena menyebabkan tersumbatnya saluran untuk *filamentous bulking* dan biosorpsi unsur radioaktif bernilai rendah untuk *pin-point*. Resirkulasi Lumpur aktif dan pemberian aerasi yang baik dapat menciptakan lumpur aktif *non-bulking*.

Unit keteknikan proses oksidasi biokimia untuk pengolahan limbah cair organik radioaktif dari industri nuklir hasil rancangannya dapat dioperasikan secara *batch* atau kontinyu dengan resirkulasi lumpur aktif dari pengepang R-02 ke reaktor oksidasi R-01 dan sebaliknya. Pemberian aerasi dengan 2 buah aerator dengan debit total udara 28 l/j terhadap larutan dalam R-01 dan resirkulasi larutan bertujuan untuk mendapatkan lumpur aktif *non-bulking*. Unit proses oksidasi biokimia hasil rancangan terdiri dari :

- a. 3 buah tangki penampung T-01, T-02 dan T-03, masing-masing berkapasitas 100 L, 1 buah untuk menampung larutan nutrisi dan 2 buah yang lain untuk menampung limbah cair.
- b. Reaktor oksidasi biokimia R-01 bentuk kotak empat persegi panjang berkapasitas 100 L yang mempunyai ukuran 80 cm x 40 cm x 40 cm.
- c. Pengepang *sludge* R-02 bentuk kotak empat persegi panjang pada bagian atasnya yang mempunyai ukuran 60 cm x 30 cm x 27 cm dan mempunyai bentuk kerucut pada bagian bawahnya dengan $tg \theta = 1/3$ dan tinggi 10 cm.
- d. Tangki penampung *sludge* T-04 dan tangki penampung beningan T-05 yang mempunyai ukuran yang sama yaitu 60 cm x 30 cm x 35 cm.
- e. Sistem perpipaan untuk pemasukan umpan limbah, resirkulasi larutan, pengeluaran beningan dan *sludge*.
- f. Pompa resirkulasi P-01 95 Watt dengan laju alir cairan 4000 L/j dan *head* 3,8 m.
- g. Aerator P-02 12 Watt dengan laju alir udara 14 L/j dan beda tekanan > 0,016 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

1. SALIMIN ZAINUS, Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Yang Mengandung Deterjen Dengan Proses Biologi Lumpur Aktif (Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan

Teknologi Nuklir, Yogyakarta 27 Juni 2002), P3TM, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta (2002)

2. PETRUCCI RALPH, H, "General Chemistry, Principles and Modern Application", Four Edition, COLIER MR MILLAN, London (1985)
3. SALIMIN ZAINUS, NANAN T.S, ACHMAD ZAID, CHOTIMAM DAN KARYONO, Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat Petrokimia Gresik (Prosiding Seminar Nasional Teknologi Limbah VI, Jakarta 24 Juni 2008), Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta (2008)
4. WESLEY, E, "Industrial Water Pollution Control", Second Edition, Mc Graw-Hill Book Company, International Edition, Singapore (1989)
5. SALIMIN ZAINUS, GUNANDJAR dan ACHMAD ZAID, Pengolahan Limbah Radioaktif Cair Organik Dari Kegiatan Dekomisioning Fasilitas Pemurnian Asam Fosfat Petrokimia Gresik Melalui Proses Oksidasi Biokimia (Prosiding Seminar Nasional Teknologi Lingkungan VI Surabaya 10 Agustus 2009), FTFP-ITS, Surabaya (2009).
6. HANEL, LBH, "Biological Treatment of Sewage by Activated Sludge Process, Theory and Operation", 3 th Ed, John Wiley and Son, New York (1979).
7. WILLIAM D BAASEL, "Preliminary Chemical Engineering Plant Design", American Elsevier Publishing Company, Inc, New York (1976).
8. BROWN, G.G, "Unit Operation", Modern Asia Edition, John Wiley and Sons, Inc, Tokyo (1973).
9. PETERS TIMMERHUS, "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", International Edition, McGraw-Hill Book Co, Singapore (1984).
10. PERRY, R.H, "Chemical Engineers Handbook" International Edition, Mc Graw-Hill Book Co, Singapore (1984).

