

363. f284
MATH
u el

**UJI KINERJA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR
INDUSTRI PAPAN PARTIKEL SECARA ANAEROB**



Tesis

Ammy Rita Manalu
L4K002004

**PROGRAM MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

TESIS

UJI KINERJA PENGOLAHAN LIMBAH CAIR INDUSTRI PAPAN PARTIKEL SECARA ANAEROB

Disusun oleh

Ammy Rita Manalu

L4K002004

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji

Pada tanggal 26 Agustus 2004

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

Menyetujui

Penguji

Ir. Agus Hadiyanto, M.T.

Pembimbing I

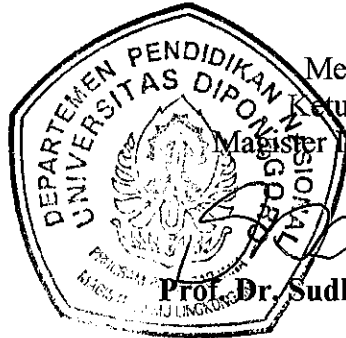
Ir. Sumarno, M.Si

Penguji

Ir. Syafrudin, CES, M.T.

Pembimbing II

Ir. Danny Sutrisnanto, M.Eng



Mengetahui,
Ketua Program
Magister Ilmu Lingkungan

Prof. Dr. Sudharto P. Hadi, MES

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan didalamnya tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan lembaga pendidikan lainnya. Pengetahuan yang diperoleh dari hasil penerbitan maupun yang belum/tidak diterbitkan, sumbernya dijelaskan didalam tulisan dan daftar pustaka.

Semarang, Agustus 2004

Ammy Rita Manalu

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Pengasih, karena dengan pertolonganNya penyusunan tesis ini dapat selesai pada waktunya. Pada kesempatan ini penulis menghaturkan terimakasih kepada:

1. Bapak Gubernur Jawa Tengah, Bapak Kepala Dinas Kehutanan Provinsi Jawa Tengah, Bapak Kepala Badan Kepegawaian Daerah Provinsi Jawa Tengah, dan Bapak Kepala Subdin Tertib Pengusahaan Hutan yang telah memberi dukungan dana, rekomendasi serta kesempatan tugas belajar kepada penulis.
2. Bapak Ir. Sumarno, M.Si sebagai Pembimbing Utama dan Ir. Danny Sutrisnanto, M.Eng sebagai Pembimbing Anggota.
3. Bapak Ir. Agus Hadiyanto, M.T dan Bapak Ir. Syafrudin, CES, M.T. sebagai Tim Penguji
4. Pimpinan dan staf PT. Rimba Partikel Indonesia dan Laboratorium Penelitian Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro yang telah memberi izin dan bantuan dalam penelitian.
5. Pengelola beserta segenap Dosen Pengampu dan Tata Usaha Program Magister Ilmu Lingkungan yang banyak membantu penulis dalam studi.
6. Rekan-rekan di Dinas Kehutanan Provinsi Jawa Tengah dan Magister Ilmu Lingkungan yang telah memberi perhatian dan dukungan kepada penulis dalam menjalani studi.
7. Ayah dan ibunda, suami dan putra-puteri serta seluruh keluarga tercinta yang selalu memberi dukungan, doa dan inspirasi kepada penulis.

Penulisan tesis ini tidak luput dari kekurangan, oleh karenanya kritik dan saran yang konstruktif senantiasa diharapkan. Semoga tesis ini bermanfaat bagi pembacanya.

Semarang, Agustus 2004

Ammy Rita Manalu

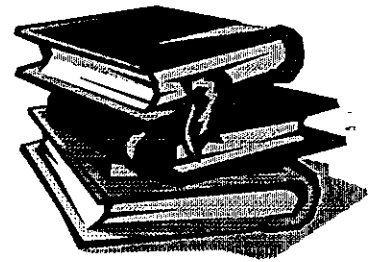
RIWAYAT HIDUP

Ammy Rita Manalu lahir di Jakarta pada tanggal 18 Maret 1970 sebagai anak ketiga dari lima bersaudara keluarga B.P. Manalu dan N. Sinaga. Penulis menamatkan pendidikan di SD Marsudirini pada tahun 1982, SMP Marsudirini tahun 1985 dan SMAN 31 pada tahun 1988, semuanya di Jakarta. Penulis menyelesaikan pendidikan tinggi pada Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor dan meraih gelar Sarjana Kehutanan pada tahun 1993.

Penulis pernah bertugas di Cabang Dinas Kehutanan Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur sejak tahun 1994. Pada tahun 1997 penulis bertugas di Kanwil Departemen Kehutanan Provinsi Jawa Tengah dan sejak tahun 2001 hingga saat ini di Dinas Kehutanan Provinsi Jawa Tengah.

Penulis menikah pada tahun 1996 dengan Ir. Elman Sirait dan dikaruniai tiga orang anak, Amelia Naomi, Jonathan Ernest dan Josephine Helena.

*Baiklah orang bijak mendengar dan menambah ilmu
dan baiklah orang yang berpengetahuan
memperoleh bahan pertimbangan (amsal 1:5)*



karya kecil untuk ayah dan ibunda tercinta

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR LAMPIRAN	v
BAB I : PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang Masalah	I-1
1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah	I-8
1.3 Tujuan Penelitian	I-8
1.4 Manfaat Penelitian	I-9
BAB II : TINJAUAN PUSTAKA	II-10
2.1 Landasan Teori	II-10
2.2 Pembahasan Penelitian Terdahulu Yang Relevan	II-25
2.3 Originalitas Penelitian	II-26
2.4 Hipotesis	II-27
BAB III : METODE PENELITIAN	III-28
3.1 Rancangan Penelitian	III-28
3.2 Ruang Lingkup	III-31
3.3 Lokasi Penelitian	III-31
3.4 Variabel Penelitian	III-32
3.5 Jenis dan Sumber Data	III-34

3.6.	Instrumen Penelitian	III-35
3.7.	Teknik Pengambilan Sampel	III-39
3.8.	Teknik Analisis Data	III-40
3.9.	Model Persamaan Kinetika Reaksi	III-43
3.10.	Analisis Statistik	III-45
3.11	Jadwal Pelaksanaan	III-47
BAB IV	: HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	IV-48
4.1..	Karakteristik Limbah Cair Industri	IV-48
4.2.	Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Efisiensi Penurunan COD	IV-50
4.3.	Pengaruh Nutrien Terbatas Terhadap Efisiensi Penurunan COD	IV-57
4.4.	Model Persamaan Kinetika Laju Biodegradasi	IV-64
4.5.	Perbandingan Kinerja dengan Target Perusahaan	IV-71
BAB V	: SIMPULAN DAN SARAN	V-74
5.1.	Simpulan	V-74
5.2.	Saran	V-75

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Level parameter kimia untuk Digester Anaerobik (Sundstrom dan Herbert, 1979)	II-18
Tabel 2.	Hasil pengukuran COD, BOD dan SS limbah industri perkayuan (Eckenfelder, 2000)	II-20
Tabel 3	Jenis dan Sumber Data Penelitian	III-35
Tabel 4.	Instrumen pendukung penelitian	III-37
Tabel 5.	Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian	III-38
Tabel 6.	Jadwal Kegiatan Penelitian	III-47
Tabel 7.	Karakteristik limbah cair industri	IV-48
Tabel 8.	Pengaruh waktu tinggal 2 hari terhadap efisiensi penurunan COD	IV-51
Tabel 9.	Pengaruh waktu tinggal 3 hari terhadap efisiensi penurunan COD	IV-51
Tabel 10.	Pengaruh waktu tinggal 4 hari terhadap efisiensi penurunan COD	IV-52
Tabel 11.	Pengaruh variasi nutrisi kontrol (tidak diberi perlakuan nutrisi) terhadap efisiensi penurunan COD	IV-57
Tabel 12.	Pengaruh rasio COD:P = 300:1 terhadap efisiensi penurunan COD	IV-58
Tabel 13.	Pengaruh rasio COD:P = 200:1 terhadap efisiensi penurunan COD	IV-58
Tabel 14.	Pengaruh rasio COD:P = 100:1 terhadap efisiensi penurunan COD	IV-59
Tabel 15.	Data penyusunan model persamaan laju biodegradasi	IV-65
Tabel 16.	Hasil penghitungan nilai ρ , X_v/ρ , $1/\rho$ dan $1/Se$	IV-66
Tabel 17.	Hasil perhitungan nilai r_s dengan model persamaan laju biodegradasi limbah	IV-68
Tabel 18.	Data pengujian validitas model persamaan laju biodegradasi limbah secara anaerob.	IV-69
Tabel 19.	Data perhitungan nilai χ^2 antara nilai r_s model dengan r_s observasi	IV-70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Diagram Alir Proses Produksi dan Sumber Pencemaran	I-3
Gambar 2	Tahap proses anaerob	II-14
Gambar 3	Alur Pikir Pendekatan Penelitian.	III-29
Gambar 4	Diagram Alir Penelitian	III-30
Gambar 5	Reaktor Upflow Anaerob Sludge Blanket dengan volume 100 liter.	III-36
Gambar 6	Konsentrasi COD pada waktu tinggal 2 hari	IV-53
Gambar 7	Konsentrasi COD pada waktu tinggal 3 hari	IV-54
Gambar 8	Konsentrasi COD pada waktu tinggal 4 hari	IV-54
Gambar 9	Efisiensi Penurunan COD pada waktu tinggal 2 hari, 3 hari dan 4 hari	IV-56
Gambar 10	Konsentrasi COD pada variasi COD:P = 300:1	IV-60
Gambar 11	Konsentrasi COD pada variasi COD:P = 200:1	IV-60
Gambar 12	Konsentrasi COD pada variasi COD:P = 100:1	IV-61
Gambar 13	Efisiensi Penurunan COD pada variasi COD:P = 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol	IV-61
Gambar 14	Grafik plot antara nilai Xv/ρ dan $1/Se$	IV-67
Gambar 15	Grafik plot antara nilai $1/\rho$ dan $1/Se$	IV-67

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Analisa konsentrasi COD efluen limbah cair IPAL PT Rimba Partikel
Indonesia
- Lampiran 2 Oneway ANOVA Efisiensi Penurunan COD pada variasi waktu tinggal 2
hari, 3 hari dan 4 hari
- Lampiran 3 T test influen dan efluen COD pada variasi waktu tinggal 2 hari, 3 hari
dan 4 hari
- Lampiran 4 Oneway ANOVA Efisiensi Penurunan COD pada variasi nutrien rasio
COD:P= 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol
- Lampiran 5 T test influen dan efluen COD pada variasi nutrien Rasio COD:P = 300:1,
200:1, 10:1 dan kontrol
- Lampiran 6 Uji R^2 , Koefisien dan Intersep Plot data antara Xv/ρ pada sumbu y dan
 $1/Se$ pada sumbu x
- Lampiran 7 Uji R^2 , Koefisien dan Intersep Plot data antara $1/\rho$ pada sumbu y dan $1/Se$
pada sumbu x
- Lampiran 8 Analisa konsentrasi COD efluen reaktor anaerob PT Rimba Partikel
Indonesia
- Lampiran 9 Foto-foto Penelitian

ABSTRAK

PT. Rimba Partikel Indonesia merupakan industri pembuatan papan partikel yang telah mengolah limbah cair organik melalui Instalasi Pengolahan AirLimbah (IPAL) secara biologis. IPAL merupakan rangkaian reaktor anaerob dan aerob yang dipasang secara seri. Namun IPAL tersebut belum beroperasi secara efisien, hal ini ditunjukkan dengan konsentrasi COD efluen IPAL yang sering melebihi baku mutu lingkungan sebesar 225 mg/l. Penelitian ini dilakukan untuk menguji kinerja reaktor anaerob dalam skala laboratorium (1:400) dengan variasi waktu tinggal (2, 3 dan 4 hari) dan variasi hara terbatas (COD:P = 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol). Reaktor diisi dengan lumpur anaerob sekitar 30 % dari volume reaktor dan dioperasikan secara kontinyu. Variabel utama yang diamati adalah konsentrasi COD influen dan efluen.

Efisiensi penurunan COD antar variasi waktu tinggal yang diteliti berbeda nyata pada tingkat kepercayaan 95 %. Efisiensi pada waktu tinggal 4 hari berbeda nyata dengan 2 hari dan 3 hari, namun efisiensi pada waktu tinggal 3 hari tidak berbeda nyata dengan 2 hari. Rata-rata efisiensi penurunan COD pada variasi waktu tinggal 4 hari sebesar 65,22 %, sedangkan 3 hari 59,15 % dan 2 hari 57,75 %.

Efisiensi penurunan COD antar variasi nutrien yang diteliti berbeda nyata pada tingkat kepercayaan 90 %. Variasi rasio COD:P=300:1 menghasilkan efisiensi rata-rata tertinggi yaitu 70,88 %, sedangkan rasio 200:1 sebesar 66,24 %, rasio 100:1 sebesar 65,75 % dan kontrol (tidak diberi perlakuan nutrien) sebesar 65,22 %. Efisiensi penurunan COD pada variasi rasio COD:P= 300:1 tidak berbeda nyata dengan rasio 200:1, namun berbeda nyata dengan rasio 100:1 dan kontrol. Apabila dibandingkan dengan target perusahaan untuk proses pengolahan limbah pada reaktor anaerob sebesar 60 %, maka pengolahan dengan penambahan nutrien pada rasio COD:P = 300:1 dengan waktu tinggal 4 hari dapat meningkatkan efisiensi rata-rata sebesar 10,88 %. Hal ini dapat menurunkan konsentrasi COD efluen reactor anaerob untuk proses pengolahan selanjutnya secara aerob.

Model persamaan pendugaan laju biodegradasi limbah cair didalam reaktor anaerob dapat disusun berdasarkan persamaan kesetimbangan substrat yang disubstitusikan dengan model Monod. Berdasarkan data penelitian model persamaan laju biodegradasi limbah dalam reaktor anaerob yang telah diverifikasi dan divalidasi adalah sebagai berikut :

$$r_s = -\rho = -\frac{0,135X_v Se}{963,621 + Se}$$

dimana r_s adalah laju biodegradasi limbah (mg/l.hari), Se adalah konsentrasi COD efluen (mg O_2/l) dan X_v adalah VSS (mg/l).

Kata kunci : Efisiensi Penurunan COD; Limbah cair organik; Nutrien; Reaktor anaerob; Waktu tinggal.

SUMMARY

PT. Rimba Partikel Indonesia is a particle board industry that has already treated its organic wastewater treatment biologically by operating a series of anaerobic and aerobic reactors. Nevertheless the wastewater treatment has not yet operated efficiently, shown by effluent COD concentration which is often over the environmental effluent standard of 225 mg/l. This study was conducted to evaluate the performance of anaerobic reactor in laboratories scale (1:400). The influence of various operating hydraulic retention time (2 days, 3 days and 4 days) and limiting nutrients with COD:P ratio = 300:1, 200:1, 100:1 and control (no nutrients added) on the efficiency are assessed. The reactor filled with anaerobic sludge about 30 % by volume and operated continuously.

Evaluation of hydraulic retention time effect on COD decreasing efficiency indicates that the COD decreasing efficiency is significantly influenced by the increase of retention time. The efficiency of 4 days retention time is significantly different from 2 days and 3 days. Nevertheless the efficiency of 3 days is not significantly different from 2 days. The mean of COD decreasing efficiency on 4 days retention time is 65,22 %, 3 days is 59,15 % and 2 days is 57,75 %.

The evaluation of adding the limiting nutrient effect on COD decreasing efficiency showed that the efficiency result of COD:P ratios are significantly different one another. The mean value of COD decreasing efficiency on COD:P ratio = 300:1 is the highest that is 70,88 %, the 200:1 ratio is 66,24 %, 100:1 ratio is 65,75 % and control (no nutrients added) is 65,22 %. The COD decreasing efficiency of COD:P ratio = 300:1 is not significantly different from 200:1 ratio, however it is significantly different from both 100:1 ratio and control. Furthermore if the experiment result is compared to the company target on anaerobic process of wastewater treatment about 60 %, the treatment of nutrient adding with COD:P ratio = 300:1 and 4 days retention time can improve the mean efficiency value about 10,88 %. This means that the effluent COD concentration will decrease for the following treatment by aerobic process.

The kinetic expression to estimate biodegradation rate of wastewater in anaerobic reactor is approached by substrate balance equation with substitution of Monod model. Based on the observation data, the biodegradation rate equation model of wastewater in anaerobic reactor that has been verified and validated has the form :

$$r_s = -\rho = \frac{0,135 X_v S_e}{963,621 + S_e}$$

where r_s refers to the wastewater biodegradation rate (mg/l.days), S_e to effluent COD concentration (mg O₂/l) and X_v to VSS (mg/l).

Keywords: Anaerobic reactor; COD decreasing efficiency; Organic Wastewater; Nutrient; Retention Time

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan air untuk industri, pertanian dan keperluan rumah tangga terus meningkat di Indonesia, terutama di Pulau Jawa. Sementara kebutuhan akan air meningkat, pemantauan kualitas air permukaan memperlihatkan bahwa kualitas air di sungai-sungai mengalami kemerosotan. Dalam beberapa kasus, terutama di kota-kota besar dan di kawasan industri, kemerosotan kualitas air sangat drastis.

Salah satu industri yang potensial menghasilkan buangan limbah cair yang mencemari badan air adalah industri pembuatan papan partikel. Industri perkayuan ini menghasilkan jenis papan yang banyak digunakan dalam permebelan, pembuatan speaker box dan lain sebagainya, dengan memanfaatkan limbah kayu yang dihasilkan oleh industri-industri kayu atau penggergajian. Namun disisi lain industri pembuatan papan partikel ini juga menghasilkan limbah cair yang mengandung bahan organik berupa serbuk kayu serta campuran lem. Kandungan bahan organik ini dapat menurunkan kualitas badan air bila dibuang langsung ke lingkungan tanpa pengolahan, karena akan menurunkan kadar oksigen terlarut dalam air. Bila hal ini dibiarkan akan menimbulkan kondisi septik dan bau yang mencemarkan lingkungan. Untuk mengurangi beban polusi, maka perlu adanya instalasi

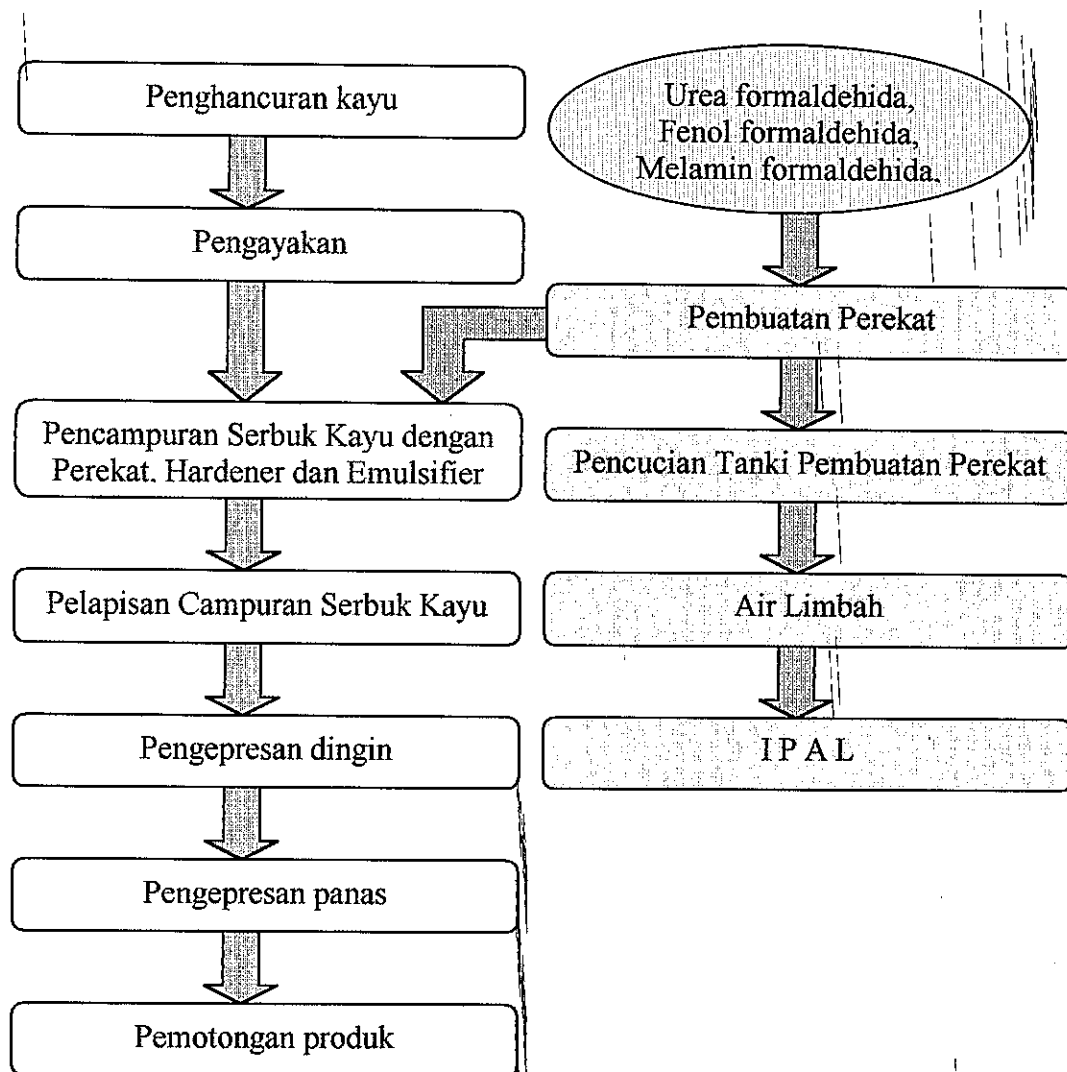
pengolahan yang memadai sehingga memenuhi baku mutu air limbah sebelum dibuang ke badan air penerima.

Air limbah yang berasal dari bahan alami pada umumnya bersifat *biodegradable* (dapat diuraikan oleh mikroba). Dewasa ini pengolahan air limbah yang bersifat *biodegradable* dapat dilakukan secara ekonomis dengan proses biologis, yang pada dasarnya merupakan upaya mengurangi atau menghilangkan zat organik dalam limbah dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme. Pengolahan ini dapat dilakukan dengan proses aerob, anaerob atau gabungan dari proses-proses tersebut.

PT. Rimba Partikel Indonesia merupakan industri pembuatan papan partikel yang berlokasi di Desa Mororejo, Kaliwungu, Kabupaten Kendal, Provinsi Jawa Tengah dengan kapasitas produksi 120.000 m³/tahun. Secara umum proses pembuatan papan partikel meliputi proses penghancuran kayu, pengeringan kayu, pengayakan kayu, pencampuran serbuk kayu dengan bahan kimia, pelapisan serbuk kayu, pengepresan dingin, pengepresan panas dan pemotongan produk. Limbah cair bersumber dari pencucian alat-alat yang digunakan dalam proses pencampuran serbuk kayu dengan bahan-bahan kimia dan dialirkan ke bak equalisasi secara kontinyu. Skema proses produksi dan sumber pencemaran dapat dilihat pada Gambar 1.

PT Rimba Partikel Indonesia telah mengolah limbah cairnya dengan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) secara biologis. Konsentrasi COD limbah fluktuatif namun relatif tinggi, yaitu diatas 1000 mg/l. Pengolahan limbah dilakukan dengan pengoperasian reaktor utama secara anaerob dan aerob yang dipasang secara seri. Setelah melalui bak equalisasi, limbah

dapat menghasilkan efisiensi biodegradasi limbah yang cukup berarti sebelum dialirkan ke reaktor aerob.



Gambar 1. Diagram alir proses produksi dan sumber pencemaran

Sejak mulai dioperasikan oleh PT Rimba Partikel Indonesia, IPAL belum dapat menghasilkan efisiensi pengolahan yang memuaskan. Data perusahaan sebagaimana pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa konsentrasi COD efluen IPAL seringkali melebihi baku mutu limbah untuk industri papan partikel sebagaimana disyaratkan dalam Keputusan Gubernur Jawa

Sejak mulai dioperasikan oleh PT Rimba Partikel Indonesia, IPAL belum dapat menghasilkan efisiensi pengolahan yang memuaskan. Data perusahaan sebagaimana pada Lampiran 1 menunjukkan bahwa konsentrasi COD efluen IPAL seringkali melebihi baku mutu limbah untuk industri papan partikel sebagaimana disyaratkan dalam Keputusan Gubernur Jawa Tengah Nomor 660.1/02/1997 sebesar 225 mg/l. Untuk itu perlu diteliti kondisi di lapangan yang mempengaruhi kinerja pengolahan limbah, baik dalam reaktor anaerob maupun aerob. Penelitian ini merupakan tahapan pertama dari satu seri penelitian proses anaerob dan aerob pengolahan limbah cair industri papan partikel PT Rimba Partikel Indonesia.

Keberhasilan pengolahan limbah secara anaerob banyak ditentukan oleh pengendalian aspek regim hidrolis, stoikiometri reaksi dan kinetika reaksi dalam reaktor. Regim hidrolis meliputi pola aliran masuk dan keluar proses, pencampuran, distribusi fluida dan padatan yang ada dalam reaktor, Aspek stoikiometri reaksi meliputi jumlah reaktan atau substrat yang dikonsumsi dan produk atau mikroorganisme yang dihasilkan. Sedangkan kinetika reaksi meliputi laju reaksi yang terjadi (Mas'ari dan Ekowati, 2000).

Pengamatan terhadap aspek regim hidrolis dilakukan dengan pengamatan terhadap pola aliran masuk dan keluar serta distribusi fluida dan padatan didalam reaktor anaerob. Pengoperasian IPAL dimulai dengan pengumpulan limbah cair dari bagian produksi ke dalam bak ekuilibrasi. Konsentrasi COD influen limbah dijaga sekitar 1500 mg/l namun pengaliran (*feeding*) limbah cair ke reaktor anaerob tidak dilakukan secara kontinyu

melainkan hanya pada jam kerja perusahaan. Pengolahan dilakukan pada waktu tinggal 3 hari dengan debit limbah yang tidak tetap (antara 20 - 60 m³/hari sesuai dengan kapasitas IPAL sebesar 60 m³/hari).

Dengan pengoperasian IPAL pada waktu tinggal 3 hari, perusahaan menargetkan efisiensi pengolahan limbah sebesar 60 %, sehingga bila nilai konsentrasi COD influen limbah sebesar 1500 mg/l maka diharapkan COD effluen limbah adalah 600 mg/l. Namun data analisa harian COD dari perusahaan menunjukkan bahwa COD effluen rata-rata sebesar 921 mg/l. Nilai ini diambil dari 10 data pengukuran COD yang pengambilan sampelnya dilakukan dalam 2 bulan, yaitu Nopember dan Desember 2003, sebagaimana pada lampiran 1. Dengan nilai rata-rata COD effluen dari proses anaerob sebesar 921 mg/l, maka reaktor anaerob beroperasi dengan efisiensi sekitar 38,6 % saja dan nilai COD tersebut masih terlalu tinggi untuk pengolahan lebih lanjut secara aerob. Secara keseluruhan pengolahan melalui rangkaian reaktor anaerob dan aerob menghasilkan effluen dengan nilai konsentrasi COD rata-rata 266,32 mg/l yang lebih tinggi dibandingkan dengan baku mutu effluen yang ditetapkan untuk limbah cair industri papan partikel, yaitu 225 mg/l. Nilai COD sebesar 266,32 mg/l merupakan rata-rata data analisa harian perusahaan selama 4 bulan (September s/d Desember 2003), sebagaimana pada lampiran 2. Rendahnya efisiensi ini diduga dipengaruhi oleh pola aliran limbah dalam reaktor yang belum optimal.

Pengaliran influen limbah yang tidak kontinyu dari bak ekualisasi ke reaktor anaerob dengan debit yang berubah-ubah menyebabkan waktu tinggal proses pengolahan juga berubah-ubah. Menurut Droste (1997)

waktu tinggal mempengaruhi proses pengolahan limbah cair secara biologis. Dengan demikian perlu diteliti pengaruh waktu tinggal terhadap efisiensi penurunan COD pada reaktor anaerob. PT Rimba Partikel Indonesia menggunakan waktu tinggal rata-rata 3 hari dalam proses pengolahan secara anaerob sehingga dalam penelitian ini ditentukan 3 variasi perlakuan waktu tinggal pengolahan limbah secara anaerob meliputi waktu tinggal yang lebih cepat yaitu 2 hari, waktu tinggal rata-rata yang sama dengan di perusahaan yaitu 3 hari dan waktu tinggal yang lebih lama yaitu 4 hari.

Aspek stoikiometri reaksi meliputi jumlah reaktan atau substrat yang dikonsumsi dan produk atau mikroorganisme yang dihasilkan. Dalam pengoperasian limbah pada IPAL perusahaan juga telah melakukan penambahan nutrisi senyawa phosphor berupa SP36 ke bak anaerob. Penambahan ini dilakukan apabila lumpur aktif mengalami drop (berkurang). Droste (1997) mengemukakan bahwa kebutuhan nutrien yang utama pada proses biologis adalah carbon, nitrogen dan phosphorus. Kandungan fosfor kira-kira seperlima kandungan massa nitrogen. Untuk proses lumpur aktif, kebutuhan rasio COD:N:P adalah 100:5:1 berdasarkan massa. Sistem anaerob menghasilkan kurang dari 20 % jumlah yang diproduksi oleh sistem aerob untuk substrat yang sama dengan kebutuhan N dan P yang lebih sedikit secara proporsional. Rasio COD:N sebesar 250:5 cukup untuk proses dengan beban yang tinggi (0,8 – 1,2 kg COD/kg VSS/hari). Berdasarkan analisa pendahuluan terhadap karakteristik limbah diketahui bahwa kandungan N total pada limbah sebesar 629,2 mg/l dan kandungan P total sebesar 1,666 mg/l, sehingga apabila konsentrasi COD

influen sebesar 1500 mg/l, maka tidak perlu penambahan nutrien N namun untuk unsur P masih perlu penambahan untuk mencukupi kebutuhan hara terbatas dalam proses pengolahan secara biologis. PT Rimba Partikel Indonesia memberi penambahan nutrien P belum dilakukan secara kontinyu dan belum diketahui takaran yang paling tepat untuk mendapatkan kinerja terbaik dalam pengolahan secara anaerob. Hal ini diduga mempengaruhi kinerja pengolahan secara anaerob, sehingga perlu diteliti pengaruh ketersediaan hara terbatas terhadap kinerja reaktor yang dicerminkan oleh efisiensi penurunan COD. Dalam penelitian ini akan dilakukan eksperimen dengan rasio hara terbatas COD:P sebesar 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol (tanpa penambahan nutrien unsur P).

Evaluasi aspek yang ketiga yaitu kinetika proses anaerob dapat didekati dengan penyusunan persamaan laju reaksi untuk mengetahui kecepatan biodegradasi limbah. Menurut Droste (1997) ada beberapa pendekatan untuk menyusun persamaan laju biodegradasi limbah cair secara biologis, diantaranya dengan persamaan Monod dan persamaan Michaelis-Menten. Proses pengolahan limbah cair secara anaerob meliputi berbagai reaksi degradasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang sederhana. Reaksi yang kompleks ini melibatkan berbagai enzim dalam proses biodegradasi, sehingga diperlukan waktu penelitian yang cukup lama untuk mengamati setiap reaksi enzim yang kompleks. Oleh karena itu dalam penelitian ini penyusunan persamaan laju biodegradasi tidak menggunakan persamaan Michaelis-Menten, melainkan menggunakan persamaan Monod sebagai pendekatan. Dalam penelitian ini perlu diteliti kemungkinan

penyusunan model persamaan berdasarkan fenomena yang diamati untuk menduga laju biodegradasi limbah.

1.2. Identifikasi dan Perumusan Masalah

Laporan perusahaan menunjukkan bahwa efisiensi pengolahan limbah belum optimal, hal ini terlihat dari data konsentrasi COD efluen IPAL yang sering melebihi baku mutu yang ditetapkan. Pengolahan limbah cair organik secara anaerob keberhasilannya ditentukan oleh banyak faktor, antara lain ketersediaan hara terbatas (*limiting substrat*) dan waktu tinggal. Bila faktor-faktor tersebut tidak dikendalikan diduga akan mempengaruhi proses pengolahan atau reaksi berjalan tidak optimal. Untuk itu permasalahan yang akan diteliti dirumuskan sebagai berikut :

- 1.2.1. Belum diketahui pengaruh waktu tinggal terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD limbah.
- 1.2.2. Belum diketahui pengaruh hara terbatas (*limiting substrat*) terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD.
- 1.2.3. Belum tersedia informasi mengenai trend kinetika reaksi biodegradasi limbah dalam pengolahan limbah cair papan partikel secara anaerob.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan kondisi operasional terbaik dalam pengolahan limbah cair industri papan partikel secara anaerob untuk :

1. mengetahui pengaruh berbagai variasi waktu tinggal dalam reaktor anaerob terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD.
2. mengetahui pengaruh berbagai variasi hara terbatas (*limiting substrat*) dalam reaktor anaerob terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD.
3. mengetahui trend kinetika laju biodegradasi limbah cair dengan menyusun model persamaan laju biodegradasi limbah dalam proses anaerob.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi kepada perusahaan mengenai kondisi operasi yang terbaik untuk proses anaerob dalam pengolahan limbah cair industri papan partikel berkaitan dengan penurunan konsentrasi COD air limbah secara efisien. Dengan demikian efluen yang keluar dari reaktor anaerob cukup rendah konsentrasinya untuk proses pengolahan selanjutnya secara aerob, sehingga diharapkan efluen yang dikeluarkan dari IPAL dapat memenuhi persyaratan baku mutu lingkungan untuk limbah cair industri papan partikel.

BAB II.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. Pembuatan Papan Partikel

Menurut Sutigno, P dan A. Santoso (1996) papan partikel berbahan baku partikel kayu, perekat organik dan bahan lainnya. Partikel berarti butir atau bahan yang berukuran relatif kecil yang dapat berasal dari pemanfaatan limbah kayu. Umumnya perekat yang digunakan terbuat dari urea formaldehida, fenol formaldehida maupun melamin formaldehida. Penggunaan perekat formaldehida yang kadar formaldehidanya tinggi akan menghasilkan papan partikel yang keteguhan lentur dan keteguhan rekat internalnya lebih baik. Secara umum pembuatan papan partikel meliputi proses penghancuran kayu, pengeringan kayu, pengayakan kayu, pencampuran serbuk kayu dengan bahan kimia, pelapisan serbuk kayu, pengepresan dingin, pengepresan panas dan pemotongan produk.

2.1.2. Karakteristik Limbah Cair Industri Papan Partikel

Limbah cair industri papan partikel mengandung serbuk kayu dan campuran lem yang merupakan senyawa-senyawa organik. Serbuk kayu terdiri dari selulosa dan hemiselulosa, yang merupakan senyawa-senyawa karbohidrat, serta lignin yang berupa lemak. Sedangkan kandungan lem yang digunakan untuk perekat dalam pembuatan papan partikel dapat berupa urea formaldehida, fenol formaldehida dan

melamin formaldehida. Menurut Manahan (1994), fenol merupakan racun protoplasmic yang merusak segala jenis sel. Sedangkan formaldehida memberi efek toksik karena produk oksidasi metabolismenya berupa asam formik. Adanya kandungan urea dalam limbah cair menyebabkan terjadi proses nitrifikasi oleh mikroorganisme. Ion ammonium merupakan senyawa nitrogen inorganik yang dihasilkan dalam biodegradasi senyawa organik nitrogen.

Laporan PT. Rimba Partikel Indonesia menunjukkan bahwa partikel board yang diproduksi terdiri dari kayu sebesar 83 %, air 7 % dan bahan-bahan kimia (perekat) 10 %. Bahan-bahan kimia tersebut meliputi formalin (CH_2O), Urea ($(\text{CNH}_2)_2\text{CO}$), melamine ($\text{C}_3\text{N}_6\text{H}_6$), hexamine ($(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$), sodium hydroxide (NaOH), asam asetat (CH_3COOH), amonium chlorida (NH_4Cl), asam sitrat dan paraffin emulsi. Sebagai campuran perekat digunakan emulsifier yang terdiri dari M2S dan lilin coklat. M2S mengandung trihydroxyethylamine stearat, asam palmitic, potassium hydroksida, formaldehyde, kerosene emulsion dan air. Bahan lain yang dicampurkan kedalam perekat adalah hardener, yang mengandung besi (Fe max 0,0001 %), logam berat (Pb max 0,0005 %), SO_4 (max 0,01 %).

2.1.3. Pengolahan Limbah Cair Industri Secara Biologis

Menurut Mardisiswoyo, P et al (____) yang dimaksud dengan limbah industri adalah segala bentuk bahan, yang tidak/belum punya arti ekonomis, yang dihasilkan suatu proses teknologi yang dipakai,

atau karena kecerobohan operator dan atau hal lain yang tidak dapat diperkirakan sebelumnya harus terbangun keluar dari berbagai unit proses yang ada. Sedangkan limbah cair industri adalah semua limbah industri yang berbentuk cairan atau berada dalam fase cair.

Pengolahan limbah cair industri pada hakekatnya adalah suatu perlakuan tertentu yang harus diberikan pada limbah cair sebelum limbah tersebut terbangun ke lingkungan, sehingga limbah tersebut tidak/kurang mengganggu lingkungan penerima limbah (Mardisiswoyo, P et al, ____). Untuk dapat menentukan secara tepat perlakuan yang sebaiknya diberikan pada limbah cair, perlu terlebih dahulu diketahui secara tepat karakteristik dari limbah melalui berbagai penetapan berbagai parameter untuk mengetahui macam dan jenis komponen pencemar serta sifat-sifatnya.

Pengolahan limbah cair meliputi pengolahan fisika, pengolahan kimia, pengolahan biologis dan pengolahan lanjut. Pengolahan fisika dilakukan terhadap air limbah dengan kandungan bahan limbah yang dapat dipisahkan secara mekanis langsung. Pengolahan secara kimia merupakan proses dimana perubahan, peruraian atau pemisahan bahan yang tidak diinginkan berlangsung karena mekanisme reaksi kimia. Pengolahan secara biologis merupakan pengolahan dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk menguraikan atau merombak senyawa-senyawa organik dalam air limbah menjadi zat-zat yang lebih sederhana (stabil). Proses pengolahan secara biologis umumnya merupakan kelanjutan dari proses pengolahan secara fisika

dan atau kimia agar air limbah bersih dari kotoran kasar serta menghilangkan atau mengeliminir zat-zat yang bersifat racun.

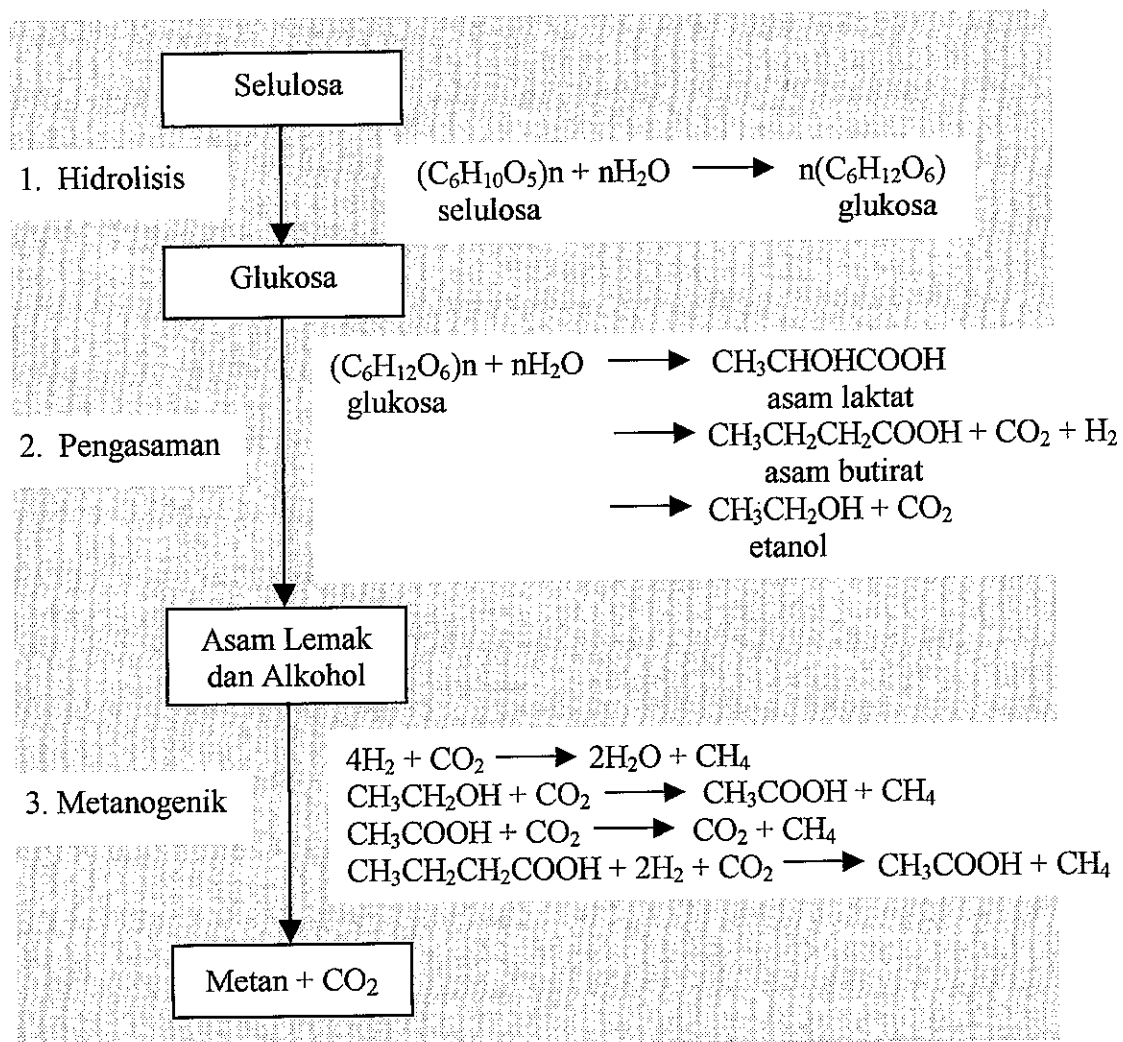
Pengolahan limbah cair secara biologis dapat dilakukan terhadap senyawa-senyawa organik yang bersifat *biodegradable*. Menurut Alaerts, G dan Sri Sumentri, SS (1984) sampel bersifat cukup *biodegradable* bila BOD/COD lebih dari 0,32 dan sangat *biodegradable* bila BOD/COD lebih dari 0,65.

Pengolahan zat organik secara biologis pada dasarnya merupakan upaya mengurangi atau bahkan menghilangkan zat organik dalam air buangan dengan memanfaatkan aktivitas mikroorganisme, yang dapat dilakukan dengan proses aerobik, anaerobik atau gabungan dari proses-proses tersebut. Degradasi zat organik secara mikrobiologis dalam kondisi anaerob hanya dapat dilakukan oleh mikroorganisme yang dapat memanfaatkan molekul selain oksigen sebagai akseptor hidrogen.

Dalam pengolahan limbah secara biologis perlu diperhatikan tiga aspek pengolahan limbah meliputi stoikiometri reaksi, rejim hidrolis dan kinetika reaksi. Stoikiometri reaksi meliputi jumlah reaktan atau substrat yang dikonsumsi dan produk atau mikroorganisme yang dihasilkan. Rejim hidrolis meliputi pola aliran masuk dan keluar proses, pencampuran, distribusi fluida dan padatan yang ada dalam reaktor, sedangkan kinetika reaksi meliputi laju reaksi yang terjadi (Mas'ari dan Ekowati, 2000).

2.1.4. Proses Anaerobik

Dekomposisi secara anaerobik merupakan penguraian limbah organik menjadi gas (methane dan karbondioksida) tanpa oksigen. Proses ini meliputi tiga tahap meliputi tahap hidrolisis, tahap pengasaman dan tahap metanogenik.



Gambar 2. Tahap proses anaerob

Bahan organik kompleks pertama kali dihidrolisis oleh bakteri chemoheterotrofik, nonmethanogen menjadi gula, alkohol, asam organik, hidrogen dan karbondioksida. Selanjutnya alkohol dan asam organik

rantai panjang dioksidasi menjadi asam asetat dan hidrogen oleh bakteri acetogen. Asam asetat dan hidrogen diubah menjadi methana oleh bakteri methanogen (Eckenfelder, 2000).

Menurut Mardisiswoyo P. et al (_____) karakteristik air limbah yang penting untuk pengolahan anaerob adalah mempunyai kandungan zat organik yang tinggi terutama protein dan lemak, relatif tinggi temperaturnya, bebas dari bahan-bahan yang toksis dan cukup mengandung nutrisi.

2.1.5. Pengendalian Proses

Proses biologis merupakan proses alami yang bersifat dinamis dan kontinyu selama faktor-faktor yang berhubungan dengan kebutuhan mikroba terpenuhi. Oleh karena itu baik faktor biotik (sifat mikroba) ataupun faktor abiotik (temperatur, kadar air, pH, nutrisi dan sebagainya) harus selalu diperhatikan agar mikroba tersebut dapat berkembang secara baik sehingga kinerja proses maksimal.

Proses anaerob banyak dipengaruhi oleh faktor-faktor fisik dan kimia yang mempengaruhi habitat mikroorganisme. Faktor-faktor tersebut adalah :

1. Temperatur

Mikroorganisme mempunyai temperatur optimum untuk pertumbuhannya. Berdasarkan temperatur optimum untuk menghasilkan metana, terdapat tiga kelompok mikroorganisme, yaitu psychophilic (15-20 °C), mesophylic (20-40 °C) dan thermophylic (40-60°C) (Droste, 1997).

2. pH

Pertumbuhan bakteri metana berada pada rentang pH yang sempit, yaitu 6,5 - 7,7. Metanogenesis akan terhenti pada $\text{pH} \leq 6,2$ sehingga pengaturan dan pengendalian pH menjadi faktor yang penting untuk diperhatikan (Setiadi,Tj, 2001). Pengaruh utama pH pada populasi golongan nonmetanogenik adalah pada jenis produk yang akan terbentuk.

3. Ammonia

Hampir semua limbah mengandung protein. Jika protein tersebut terdegradasi, maka senyawa nitrogen akan terbebaskan sebagai ammonia. Ammonia bebas akan bersifat toksik pada konsentrasi 150 mg/l, sedangkan jika dalam bentuk ion ammonia baru akan bersifat toksik pada konsentrasi lebih dari 3 000 mg/l. Pada pH sekitar 7,2 atau kurang, ammonia sebagian besar akan berada dalam bentuk ion ammonium dan bersifat toksik pada konsentrasi total ammonia 3000 mg/l.

4. Nutrien

Kebutuhan nutrien yang utama pada proses biologis adalah carbon, nitrogen dan phosphorus (Droste, 1997). Kandungan fosfor kira-kira seperlima kandungan massa nitrogen. Untuk proses lumpur aktif, kebutuhan rasio COD:N:P adalah 100:5:1 berdasarkan massa. Sistem anaerob menghasilkan kurang dari 20 % jumlah yang diproduksi oleh sistem aerob untuk substrat yang sama dengan kebutuhan N dan P yang lebih sedikit secara proporsional. Rasio

COD:N sebesar 250:5 cukup untuk proses dengan beban yang tinggi (0,8 – 1,2 kg COD/kg VSS/hari) (Droste, 1997).

Menurut Chariton A.P dan Wahyno Hadi (2000) untuk aktivitas pertumbuhan mikroba unsur-unsur C, N, dan P harus ada dan tercukupi. Ketidakhadiran atau kekurangan nutrisi esensial ini dapat menghambat rate reaksi yang bersangkutan. Ada 4 langkah pembatas rate yaitu konversi selulosa menjadi gula terlarut oleh enzim ekstraselular, formasi asam volatil oleh bakteri pembentuk asam, konversi asam volatil menjadi CO₂ dan CH₄ oleh bakteri metana, dan transfer hasil reaksi terlarut fase cair ke gas.

5. Kation

Menurut Chariton A.P dan Wahyono Hadi (2000) pengaruh kation dalam pengolahan anaerobik merupakan fungsi semua jenis dan konsentrasi kation. Konsentrasi optimum ion 0,01 M untuk monovalen Na,K,NH₄ dan 0,005 M untuk ion divalent Ca,Mg. Penghambatan yang disebabkan oleh konsentrasi yang berlebihan dari salah satu ion dapat diantagonis (diminimalkan) dengan penambahan optimum ion lain. Antagonisme maksimal kation penghambat diperoleh dengan penambahan konsentrasi optimum beberapa kation lain, lebih dari satu.

6. Waktu Retensi

Dalam proses pengolahan anaerob pengendalian umur lumpur atau *Solid Retention Time* (SRT) memegang peranan penting. SRT merupakan waktu rata-rata untuk suatu partikel solid tinggal dalam reaktor. Dalam proses pertumbuhan tersuspensi, SRT sama untuk

semua partikel solid, baik berasal dari sumber biologis atau bukan. Menurut Droste (1997), dalam reaktor pertumbuhan tersuspensi tanpa pengembalian (*recycle*), SRT sama dengan HRT (*hydraulic retention time*). Suatu SRT minimum harus dijaga sedemikian untuk memungkinkan mikroorganisme bereproduksi sebelum keluar dan terbangun dari sistem. Lawrence dan Mc Carty (1969) dalam Droste (1997) mengemukakan bahwa hasil penelitian laboratorium, SRT minimum untuk pembentukan metana adalah 3-5 hari pada temperatur 35°C. Semua sistem biologis memerlukan faktor keamanan antara 3 – 20 kali waktu minimum SRT untuk keberhasilan operasi.

Untuk mengendalikan reaksi methane agar beroperasi pada kecepatan maksimum, perlu dilakukan monitoring dan pengontrolan parameter digester. Sundstrom dan Herbert (1979) mengemukakan beberapa level parameter yang harus dikontrol adalah sebagaimana pada Tabel 1.

Tabel 1. Level parameter kimia untuk Digester Anaerobik (Sundstrom dan Herbert, 1979)

Parameter	Level
PH	6,6 – 7,6
Alkalinitas bikarbonat	1000 – 5000 mg/l sebagai CaCO ₃
Konsentrasi asam volatile	1 – 5 mmol/l
Kation alkali	< 2500 mg/l
Konsentrasi ammonia	< 1000 mg NH ₄ -N/l
Logam berat	< 1 ppm
Konsentrasi sulfida	< 200 mg/l
Temperatur	80 ° – 110 ° F (mesofilik)
Kecepatan produksi gas	1 l/g konsumsi asam volatile
CO ₂ dalam gas yang dihasilkan	30 – 35 %

2.1.6. Efisiensi Proses Pengolahan

Menurut Droste (1997) efisiensi pengolahan limbah merupakan rasio antara konsentrasi kandungan organik yang disisihkan melalui proses pengolahan dengan konsentrasi awal. Efisiensi pengolahan limbah dihitung sebagai berikut :

$$\eta = \frac{S_o - S_e}{S_o} \quad (3.1)$$

dimana η adalah efisiensi (%)

S_o adalah konsentrasi COD influen

S_e adalah konsentrasi COD effluen

Faktor efisiensi berkaitan dengan efisiensi pengolahan secara keseluruhan (ditunjukkan dengan penurunan COD dalam limbah) dan konsentrasi senyawa nonbiodegradable dalam influen berkisar antara 0,6 – 0,9. Batas minimum konsentrasi COD influen untuk mencapai keberhasilan pengolahan anaerob adalah 1000 mg/l, meskipun beberapa penelitian menunjukkan keberhasilan pengolahan pada konsentrasi COD yang lebih rendah (Droste, 1997). Bertambahnya konsentrasi substrat influen akan meningkatkan efisiensi proses biologis.

Hasil pengukuran parameter kualitas air limbah industri perkayuan yang belum diolah dengan effluen proses anaerobik dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Hasil pengukuran COD, BOD dan SS limbah industri perkayuan (Eckenfelder, 2000)

Limbah	Limbah belum diolah				Effluen Proses Anaerobik			
	COD mg/l	BOD Mg/l	BOD/ COD	SS mg/l	COD mg/l	BOD mg/l	BOD/ COD	SS mg/l
Penggergajian kayu	12.930	5.990	0,46	486	2.590	740	0,29	507
Pulp semikimia	6.826	2.221	0,32	851	3.822	524	0,14	881
Pulp dan kertas	5.349	2.287	0,43	3.792	965	308	0,32	199

2.1.7. Pertumbuhan Bakteri

Hendarko, S et al (2002) mengemukakan bahwa pada umumnya bakteri memperbanyak diri secara pembelahan biner. Waktu yang diperlukan untuk membelah diri dari satu sel menjadi dua sel yang sempurna disebut waktu generasi. Waktu generasi tidak selalu tetap tetapi tergantung pada faktor-faktor dalam medium, spesies dan umur bakteri. Pengukuran pertumbuhan atau perbanyakan bakteri dapat dilakukan dengan mengukur penambahan berat (berat kering) atau perhitungan jumlah bakteri.

Selanjutnya dikemukakan bahwa pertumbuhan bakteri meliputi fase pertumbuhan yang terdiri dari : fase permulaan, fase pertumbuhan dipercepat, fase logaritma, atau fase eksponensial, fase pertumbuhan yang mulai terhambat, fase stasioner yang maksimum, fase kematian yang dipercepat dan fase kematian logaritma.

1. Fase Permulaan

Pada fase ini bakteri baru menyesuaikan diri dengan lingkungan yang baru. Bernacam-macam enzim dan zat perantara dibentuk sehingga keadaannya memungkinkan terjadinya pertumbuhan lebih lanjut. Sel-sel mulai membesar tetapi belum membelah diri.

2. Fase pertumbuhan yang dipercepat

Pada fase ini bakteri mulai membelah diri, tetapi waktu generasinya masih panjang. Waktu pertumbuhan yang dipercepat bersama-sama dengan fase permulaan sering disebut "*lag phase*" atau "*phase of adjustment*".

3. Fase pertumbuhan logaritma

Pada fase ini kecepatan pembelahan paling tinggi, waktu generasi paling pendek dan konstan, metabolisme paling cepat sehingga sintesis bahan sangat cepat dan konstan. Keadaan ini berlangsung terus hingga salah satu atau beberapa nutrisi habis atau terjadi penimbunan hasil-hasil metabolisme yang bersifat racun yang menyebabkan terhambatnya pertumbuhan.

4. Fase pertumbuhan yang mulai terhambat

Setelah melalui fase logaritma, kecepatan pembelahan akan berkurang dan jumlah bakteri yang mati bertambah banyak. Hal ini disebabkan makin berkurangnya nutrisi dan mulai terjadi penimbunan racun-racun sebagai hasil kegiatan metabolisme. Selain itu karena ada perubahan pH, dll. Dengan penambahan nutrisi dan penetralan hasil-hasil yang bersifat racun, fase logaritma dapat diperpanjang.

5. Fase stasioner yang maksimum

Adanya penurunan kadar nutrisi dan meningkatnya penimbunan zat-zat racun menghambat terhadap kecepatan pembelahan

6. Fase kematian yang dipercepat dan fase kematian log.

Kedua fase ini biasanya dinyatakan sebagai satu fase yang disebut fase menurun. Pada fase ini kecepatan kematian meningkat terus menerus sedang kecepatan pembelahan menjadi nol. Setelah sampai ke fase kematian log, kecepatan kematian menjadi maksimal, jumlah sel menurun menurut deret ukur. Penurunan ini hanya mencapai jumlah minimum tertentu. Secara teoritis sejumlah kecil selnya akan masih tetap bertahan untuk waktu yang sangat lama dalam medium tersebut, tergantung dari spesies bakterinya.

2.1.8. Kinetika Biodegradasi Limbah

Kinetika biodegradasi limbah meliputi pendugaan kecepatan reaksi biodegradasi senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Menurut Droste (1997: 562) ada beberapa pendekatan untuk mengetahui kinetika biodegradasi limbah, antara lain dengan permodelan sistem dinamis. Penyusunan model persamaan kinetika biodegradasi limbah dapat didekati berdasarkan persamaan neraca substrat (*substrat balance*). Persamaan umum neraca substrat untuk reaktor tersuspensi tanpa pengembalian (*recycle*) adalah :

$$V \frac{dS_{el}}{dt} = QS_o - QS_{el} + r_s V = 0 \quad (2.2)$$

$$r_s = -\frac{Q(S_o - QSe)}{V} = -\frac{(S_o - S_e)}{\theta_d} = -\rho \quad (2.3)$$

Untuk menghitung laju pengolahan limbah (ρ) dapat didekati dengan menggunakan persamaan Michaelis-Menten maupun persamaan Monod. Persamaan Michaelis Menten menyatakan kinetika enzim, berdasarkan pada reaksi katalisis enzim sebagai berikut:



dimana E adalah enzim

S adalah substrat

P adalah produk

ES adalah enzim intermediate dari kompleks substrat

k_i adalah konstanta laju

Laju reaksi menurut persamaan Michaelis- Menten mengikuti persamaan sebagai berikut:

$$v = \frac{v_{\max} [S]}{K + [S]} \quad (2.5)$$

K merupakan konstanta laju setengah atau disebut konstanta Michaelis-Menten, yang dapat dihitung sebagai berikut:

$$K = \frac{k_1 + k_4}{k_2} \quad (2.6)$$

Penentuan konstanta-konstanta laju individual cukup sulit karena reaksi anaerob melibatkan enzim yang kompleks.

Pendekatan lain yang lebih sederhana untuk menyusun persamaan laju biodegradasi limbah adalah dengan persamaan Monod (Droste, 1997).

Persamaan Monod menyatakan hubungan antara waktu, jumlah substrat dengan jumlah mikroorganisme dengan persamaan (3.7) dan (3.8) sebagai berikut:

$$rs = -\rho = -\frac{kX_v Se}{K + Se} \quad (2.7)$$

$$rs = -\rho = -\frac{kSe}{K + Se} \quad (2.8)$$

Apabila persamaan Monod (2.7) dan (2.8) disubstitusikan untuk nilai rs pada persamaan (2.3) maka persamaannya menjadi :

$$\frac{X_v}{\rho} = -\frac{X_v \theta d}{(S_o - S_e)} = \frac{K}{k} \frac{1}{S_e} + \frac{1}{k} \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\theta d}{(S_o - S_e)} = \frac{K}{k} \frac{1}{S_e} + \frac{1}{k} \quad (2.10)$$

dimana :

rs : laju penysisihan substrat

ρ : laju pengolahan limbah

V : volume

X_v : VSS anaerobik dalam reaktor

V : volume reaktor

Q : laju alir

o : subskrip yang menyatakan konsentrasi influen reaktor

e : subskrip yang menyatakan konsentrasi efluen reaktor

θd : waktu tinggal

K : konstanta kecepatan setengah

k : koefisien laju keseluruhan

t : waktu

S : konsentrasi substrat (asam volatil)

X : konsentrasi mikroorganisme

Persamaan Monod merupakan pendekatan yang lebih sederhana dalam penyusunan laju biodegradasi limbah secara anaerob. Selanjutnya untuk menghitung nilai konstanta k dan K dilakukan metode regresi plot data dengan metode Lineweaver-Burke plot (Droste, 1997). Apabila model telah tersusun perlu dipastikan bahwa parameter yang dihitung dengan model tersebut dapat mewakili nilai sebenarnya didalam sistem (Jorgensen, 1994). Pengujian nilai parameter berdasarkan model dengan data bebas disebut validasi. Validasi mengkonfirmasi perilaku model dibawah kondisi yang diwakili oleh data yang cukup.

2.2. Pembahasan Penelitian Terdahulu Yang Relevan

Hasil penelitian Bachman et al (1982) dalam Yuliati S dan Sarwoko Mangkoedihardjo (2001) menunjukkan bahwa reaktor jenis anaerobic horizontal baffled reactor mampu menyisihkan COD hingga 80 % dengan produksi gas volumetric sebesar 2,9 dimana COD influen sebesar 7,1 gram/l dengan waktu detensi hidrolis selama 10 hari pada suhu 35°C.

Penelitian yang dilakukan oleh Yuliati S dan Sarwoko Mangkoedihardjo (2001) menunjukkan efisiensi penurunan COD limbah

tempe dengan reactor anaerob bersekat horizontal sebesar 81,92 %. Dengan komposisi nutrisi yang kurang memadai (COD:N:P = 8738 mg/l: 23,77 mg/l: 1,92 mg/l atau 300:0,8:0,06) ternyata reaktor tetap dapat menghasilkan efisiensi penurunan yang cukup tinggi.

Astuti, AD dan Asis HD (2000) mengemukakan hasil penelitian penyisihan substrat dalam bioreaktor hybrid anaerobic untuk mengolah limbah molase, bahwa selain dipengaruhi VSS awal, efisiensi penyisihan juga sangat dipengaruhi waktu detensi. Semakin tinggi VSS awal akan memberi efisiensi penyisihan lebih tinggi dan waktu detensi yang diperlukan lebih pendek. Namun efisiensi penyisihan dalam penelitian tersebut tidak dipengaruhi oleh konsentrasi COD awal.

2.3. Originalitas Penelitian

Penelitian mengenai proses anaerobik untuk pengolahan limbah organik bukanlah penelitian yang baru. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan di Indonesia mengenai pengolahan limbah cair organik dengan proses anaerob antara lain pengolahan lumpur biologis dengan proses anaerob digestion (Marpaung, R dan Anwar Basuki, 2001), pengolahan limbah molase dengan bioreaktor hybrid anaerobic (Astuti, AD dan Asis H.D, 2000) dan penurunan COD limbah tempe dengan anaerobic horizontal baffled reactor (Yuliati, S dan Sarwoko Mangkoedihardjo, 2001). Penelitian proses anaerob dalam pengolahan limbah cair industri papan partikel menggunakan reaktor UASB belum pernah dilakukan sebelumnya.

2.4. Hipotesis

Penelitian ini dilakukan dengan hipotesis sebagai berikut :

1. H₀ : Variasi waktu tinggal 4 hari, 3 hari dan 2 hari diduga memberi pengaruh yang sama terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD.
H₁ : Variasi waktu tinggal 4 hari, 3 hari dan 2 hari diduga memberi pengaruh yang berbeda terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD.
2. H₀ : Variasi kondisi hara terbatas (*limiting substrat*) dengan rasio COD:P sebesar 300:1, 200:1,100:1 dan kontrol diduga memberi pengaruh yang sama terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD.
H₁ : Variasi kondisi hara terbatas (*limiting substrat*) dengan rasio COD:P sebesar 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol diduga memberi pengaruh yang berbeda terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD
3. H₀ : Model persamaan laju reaksi biodegradasi limbah cair dapat disusun untuk menduga kinetika proses pengolahan limbah cair secara anaerob
H₁: Model persamaan laju reaksi biodegradasi limbah cair tidak dapat disusun untuk menduga kinetika proses pengolahan limbah cair secara anaerob

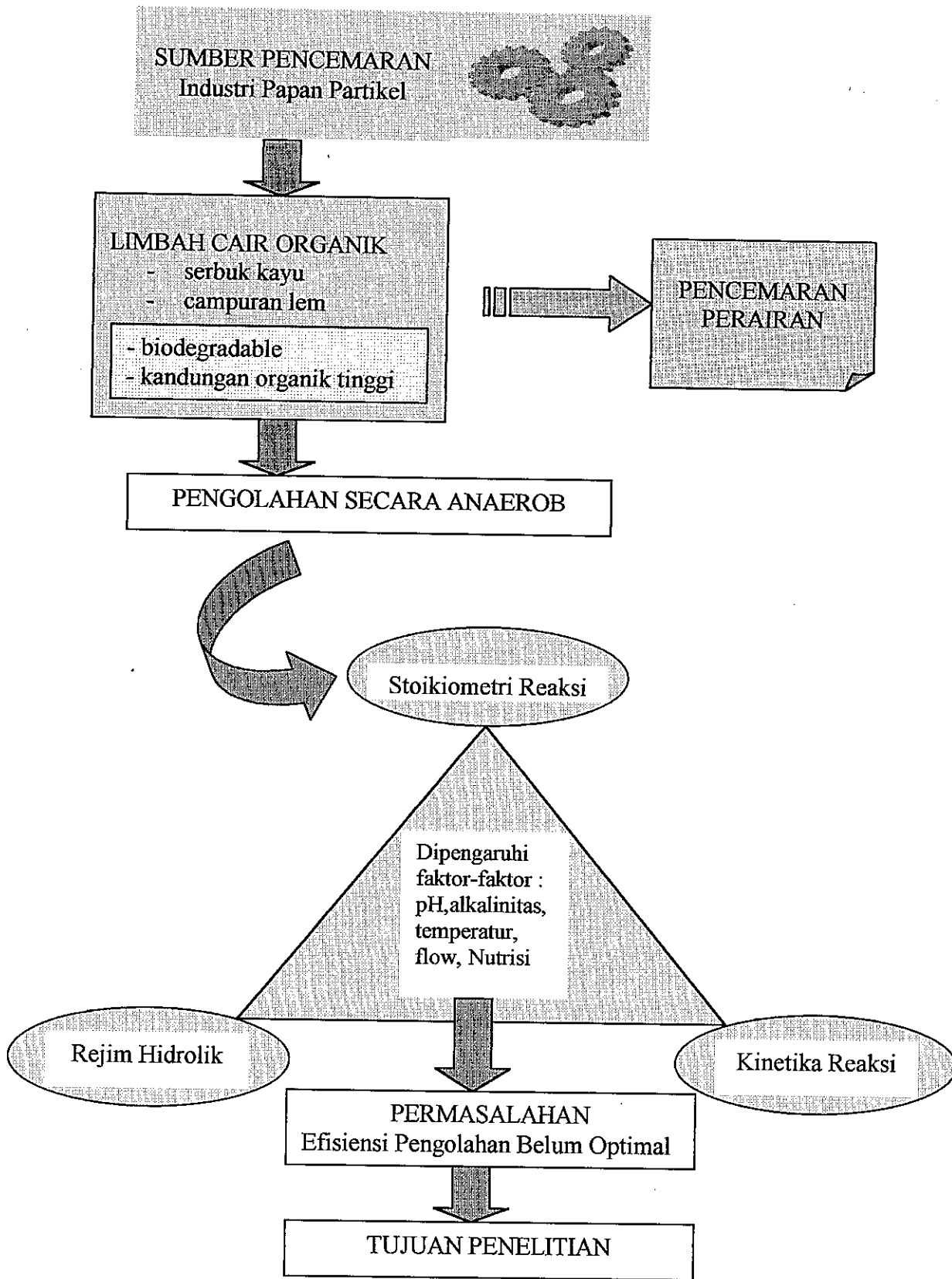
BAB III

METODE PENELITIAN

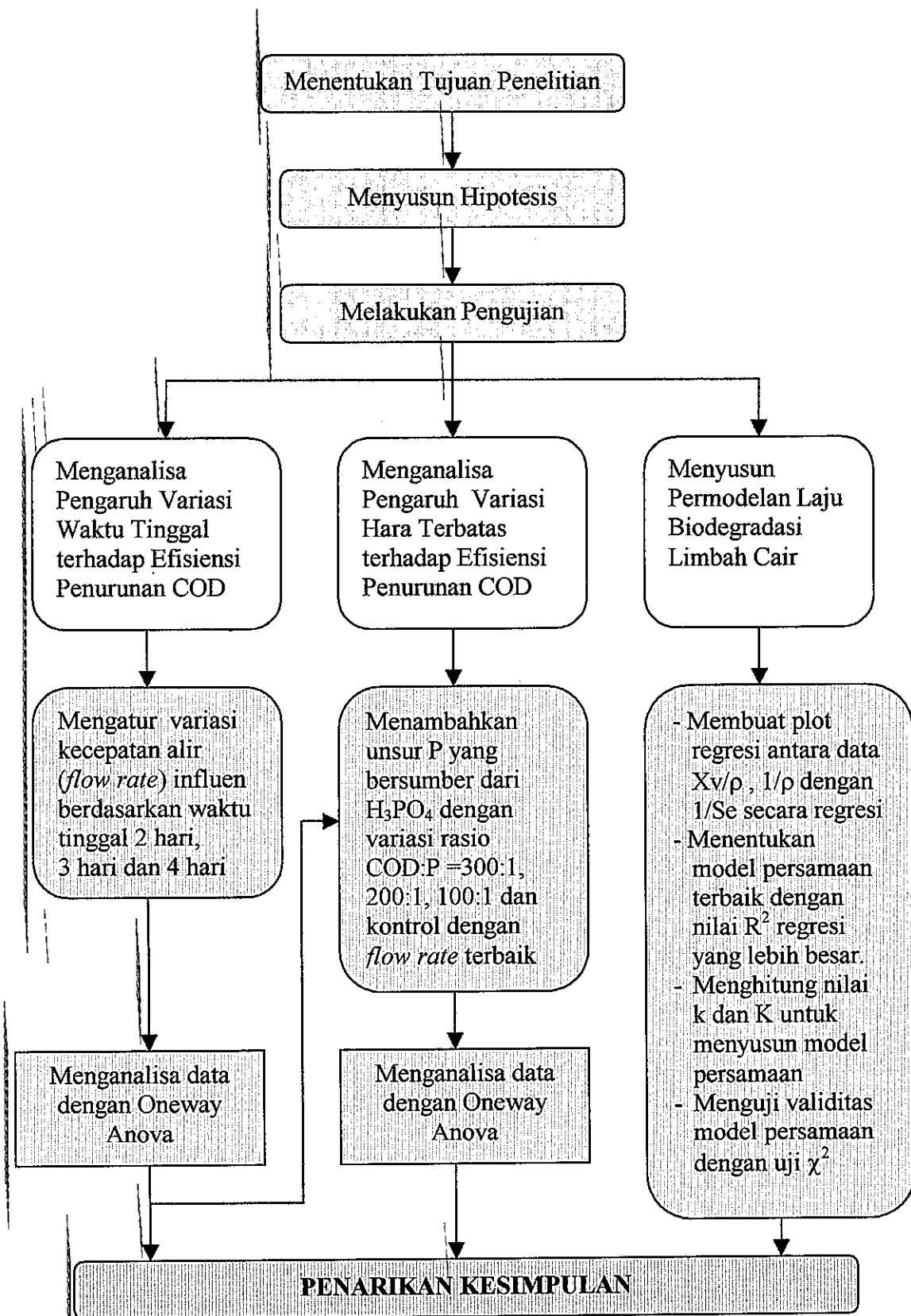
3.1. Rancangan Penelitian

Sebagaimana dikemukakan pada bab terdahulu bahwa tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu tinggal dan hara terbatas terhadap efisiensi penurunan COD serta kinetika biodegradasi limbah cair dalam proses anaerobik. Penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dengan melakukan eksperimen di laboratorium dan didukung dengan berbagai informasi mengenai pengelolaan limbah cair PT Rimba Partikel Indonesia.

Penelitian ini merupakan uji kinerja pengolahan limbah cair industri PT. Rimba Partikel Indonesia dalam skala laboratorium dengan variasi waktu tinggal (2 hari, 3 hari dan 4 hari), dan variasi hara terbatas dengan rasio COD:P (300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol). Dalam penelitian variasi nutrisi, unsur nitrogen dan unsur-unsur mikro bukan merupakan hara terbatas (*limiting substrat*), mengingat bahwa limbah yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah asli yang mengandung perekat urea dan serbuk kayu yang mengandung berbagai mineral. Dengan demikian nitrogen dan unsur-unsur mikro tidak dijadikan variasi penelitian. Variabel utama yang diamati adalah penurunan COD. Pendekatan penelitian secara skematis dapat dijelaskan pada Gambar 3. Sedangkan diagram alir prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Alur Pikir Pendekatan Penelitian.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

3.2. Ruang Lingkup

Lingkup penelitian meliputi uji laboratorium mengenai kondisi terbaik dengan variasi waktu tinggal dan variasi ketersediaan hara terbatas untuk proses anaerobik pengolahan limbah cair organik dari industri papan partikel. Proses *seeding* dilakukan dengan mengambil lumpur anaerob dari IPAL PT Rimba Partikel Indonesia untuk mempercepat proses aklimatisasi.

3.3. Lokasi Penelitian

Sampel air diambil dari limbah cair asli dari industri pembuatan papan partikel yaitu PT. Rimba Partikel Indonesia di Kabupaten Kendal sebagai industri perkayuan di Jawa Tengah yang membuang limbah cair organik. Perusahaan ini dipilih karena kegiatan usahanya pernah menimbulkan dampak lingkungan akibat limbah cair yang dibuang ke perairan telah menyebabkan pencemaran badan air yaitu Kali Wakak dan pertambakan. Dalam Rencana Pemantauan Lingkungan (RPL) PT Rimba Partikel Indonesia dikemukakan bahwa pencemaran tersebut telah menyebabkan penurunan angka kelimpahan dan indeks keragaman jenis plankton dan benthos, serta penurunan produktivitas ikan. Setelah perusahaan membangun instalasi pengolahan air limbah (IPAL) pencemaran dilaporkan telah berkurang, namun data laporan harian perusahaan menunjukkan bahwa efluen yang dihasilkan sering diatas baku mutu yang ditetapkan. Hal ini diduga karena kondisi operasional IPAL belum optimal.

Eksperimen dan analisa data tidak dilakukan di industri, melainkan di Laboratorium Penelitian Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro. Hal ini dimaksudkan untuk mempermudah dalam pengaturan dan pengendalian flow rate, konsentrasi influen, pH, temperatur, analisa parameter dan sebagainya.

3.4. Variabel Penelitian/Fenomena yang Diamati

3.4.1. Klasifikasi Variabel

Variabel penelitian dan fenomena yang diamati meliputi penurunan konsentrasi COD dari limbah cair pabrik papan partikel pada variasi waktu tinggal dan variasi konsentrasi COD:P serta kinetika reaksi biodegradasi limbah. Unsur N dan unsur-unsur mikro bukan merupakan hara terbatas, karena diduga konsentrasi N dalam limbah berlebihan yang bersumber dari urea yang terkandung dalam perekat, sedangkan mikronutrien bersumber dari berbagai mineral dalam serbuk kayu.

3.4.2. Definisi Konseptual Variabel

Variabel utama yang diamati dalam penelitian ini adalah COD (*chemical oxygen demand*). Menurut Alaertz dan Santika (1984) COD adalah jumlah oksigen (mg O_2) yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organis yang ada dalam 1 liter sampel air. Nilai COD merupakan ukuran pencemaran air oleh zat-zat organis yang secara alamiah dapat dioksidasikan melalui proses mikrobiologis dan mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut didalam air. Sedangkan definisi COD yang

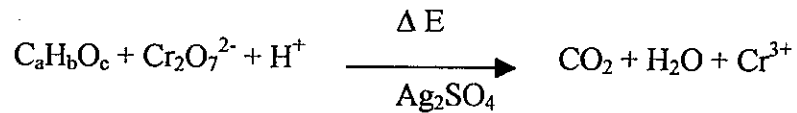
dikemukakan oleh Droste (1997) merupakan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk menstabilisasi bahan organik, yang nilainya ditentukan dengan menggunakan oksidator kuat. Idealnya oksidator ini harus dapat mengoksidasi berbagai senyawa organik namun tidak mahal. Oksidator yang memenuhi kriteria ini adalah dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$).

Menurut Alaertz dan Santika (1984) tes COD hanya merupakan suatu analisa yang menggunakan suatu reaksi oksidasi kimia yang menirukan oksidasi biologis (yang sebenarnya terjadi di alam), sehingga merupakan suatu pendekatan saja. Karena hal tersebut diatas maka tes COD tidak dapat membedakan antara zat-zat yang sebenarnya tidak teroksidasi (inert) dan zat-zat yang teroksidasi secara biologis. COD akan menurun karena oksidasi bahan organik namun nilainya lebih tinggi daripada BOD karena produksi beberapa substansi yang sulit didegradasi.

3.4.3. Definisi Operasional Variabel

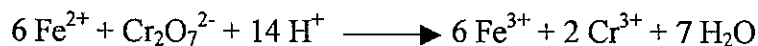
Uji COD mengukur total organic carbon dengan pengecualian bahan aromatik tertentu, seperti benzena, yang tidak dapat teroksidasi sempurna dalam reaksi. Uji COD merupakan reaksi reduksi-oksidasi, sehingga bahan tereduksi lain, seperti sulfida, sulfit, dan besi ferrous, juga dapat teroksidasi dan terukur sebagai COD. $\text{NH}_3\text{-N}$ tidak akan teroksidasi dalam uji COD (Eckenfelder W.W, 2000)

Zat organik melalui tes COD dioksidasi oleh larutan $K_2Cr_2O_7$ dalam keadaan asam yang mendidih dengan reaksi :



Perak sulfat $AgSO_4$ ditambahkan sebagai katalisator untuk mempercepat reaksi. Sedangkan merkuri sulfat ditambahkan untuk menghilangkan gangguan klorida yang pada umumnya ada di dalam air buangan.

Untuk memastikan bahwa hampir semua zat organik habis teroksidasi maka zat pengoksidasi $K_2Cr_2O_7$ masih harus tersisa sesudah direfluks. $K_2Cr_2O_7$ yang tersisa didalam larutan tersebut digunakan untuk menentukan berapa oksigen yang telah terpakai. Sisa $K_2Cr_2O_7$ tersebut ditentukan melalui titrasi dengan fero amonium sulfat (FAS), dimana reaksi yang berlangsung adalah sebagai berikut :



Indikator feroin digunakan untuk menentukan titik akhir titrasi yaitu saat warna hijau biru larutan berubah menjadi coklat merah. Sisa $K_2Cr_2O_7$ dalam larutan blanko adalah $K_2Cr_2O_7$ awal, karena diharapkan blanko tidak mengandung zat organik yang dapat dioksidasi oleh $K_2Cr_2O_7$.

3.5. Jenis dan Sumber Data

Data yang diambil sebagai bahan analisis dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 3. Jenis dan Sumber Data Penelitian

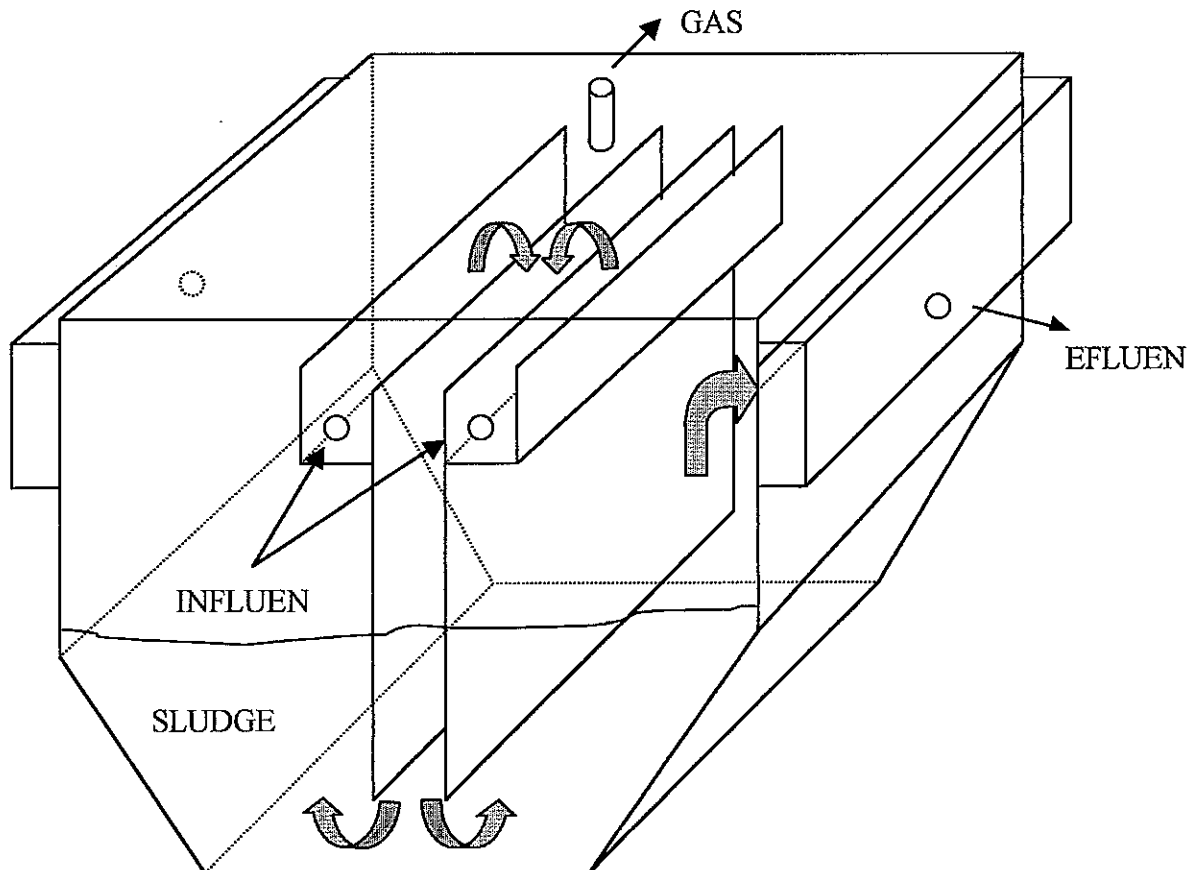
Jenis	Sumber Data	Data
Data Primer Parameter yang dikendalikan	Analisa parameter	pH, temperatur, debit influen, volume lumpur, MLVSS.
Parameter utama	Analisa parameter	COD
Parameter pendukung	Analisa laboratorium	BOD, N total, P, Phenol, Ammonia.
Data Sekunder	PT. Rimba Partikel Indonesia	Laporan harian dan bulanan Analisa parameter.

3.6. Instrumen Penelitian

Proses pengolahan air limbah cair industri papan partikel skala laboratorium menggunakan instrumen utama Digester Anaerob (Upflow Anaerob Sludge Blanket) yang merupakan reaktor kontinyu, terbuat dari kaca dengan volume 100 liter, yang dioperasikan pada temperatur mesofilik dan pH netral. Desain alat merupakan miniatur dari reaktor anaerob PT Rimba Partikel Indonesia dengan skala 1:400 sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5. Volume lumpur anaerob dalam reaktor pada saat awal (*start up*) dan setiap kali pergantian variasi penelitian adalah 30% volume reaktor.

Influen berasal dari bak ekualisasi agar kondisi limbah seragam. Selanjutnya setelah diolah, efluen dialirkan ke bak aerob untuk pengolahan lebih lanjut. Setelah tercapai kondisi *steady state*, dilakukan pencatatan pengamatan penurunan konsentrasi COD pada variasi waktu tinggal hidrolik 4 hari (debit 100 L / 4 hari = 25 L/hari), 3 hari (debit 100 L / 3 hari = 33,3 L / hari), 2 hari (debit 100 l / 2 hari = 50 L/hari). Setelah diketahui waktu tinggal terbaik maka akan digunakan dalam penentuan *flow rate* untuk pengamatan perlakuan nutrisi terbatas dengan variasi rasio COD: P

=300:1, 200:1 dan 100:1. Waktu tinggal terbaik tanpa penambahan nutrisi menjadi kontrol dalam pengamatan pengaruh nutrisi terbatas.



Gambar 5. Reaktor Upflow Anaerob Sludge Blanket dengan volume 100 liter.

Instrumen pendukung yang digunakan dalam analisis data adalah sebagaimana pada Tabel 5 :

Tabel 5. Instrumen pendukung penelitian

No.	Nama Alat	Kegunaan
1.	Buret	Untuk titrasi
2.	Statif dan klem	Untuk menyangga buret
3.	Erlenmeyer	Tempat pereaksi
4.	Pipet	Memindahkan media cair
5.	Gelas Ukur	Mengukur volume media cair
6.	Tabung reaksi	Tempat pencampuran dengan reagen
7.	Oven	Memanaskan sampel air pada suhu 105 ⁰ C
8.	Dessikator	Menyerap uap air
9.	Stopwatch	Mengukur waktu
10.	Neraca Sartorius	Mengukur berat
11.	Kertas saring Whatman	Untuk menyaring limbah cair
12.	Universal Indicator pH	Mengukur pH
13.	Furnace	Memanaskan sampel pada suhu 550 ⁰ C
14.	Pipet Ukur	Memindahkan media cair dengan volume tertentu
14.	Imhoff Cone	Mengukur volume lumpur dalam sampel air
15.	Labu Takar	Mengencerkan sampel air
16.	Cawan Petri	Tempat sampel limbah yang dipanaskan
17.	Kertas label	Memberi nama sampel uji
18.	Botol inkubasi Winkler	Tempat mencampur sampel dan reagen

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian dan pendukung analisa data sebagaimana pada Tabel 4.

Tabel 4. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian

No.	Nama Bahan	Kegunaan
1.	Limbah cair asli dari PT. Rimba Partikel Indonesia	Sampel air yang akan diteliti
2.	Lumpur aktif (sludge) dari reaktor anaerob PT. Rimba Partikel Indonesia	Sumber mikroorganisme pendegradasi limbah cair
3.	$K_2Cr_2O_7$	Oksidator dalam test COD
4.	Ag_2SO_4	Katalisator dalam test COD
5.	Ferro Ammonium Sulfat (FAS) $Fe(NH_4)(SO_4).6H_2O$	Larutan titran dalam test COD
6.	H_2SO_4 pa	Mengawetkan sample dan menjaga pH
7.	Feroin (Fenantrolin fero sulfat) $FeSO_4.7H_2O$	Indikator dalam test COD
8.	$HgSO_4$	Pengikat Cl^-
9.	Aquades	Mengencerkan sampel, pembilas
10.	Larutan Mangan Sulfat $MnSO_4.4H_2O$	Reagen test BOD
11.	Larutan alkali Iodida Azida	Reagen test BOD
12.	Larutan Feriklorida	Reagen test BOD
13.	Larutan kalium fluorida $KF.2H_2O$	Reagen test BOD
14.	Larutan natrium tiosulfat 0,25 N $Na_2S_2O_3.5H_2O$	Larutan titran
15.	Kanji Amilum 0,5 %	Indikator dalam test BOD
16.	Kalium Iodida murni (pa)	Reagen test BOD
17.	H_3PO_4 (Asam fosfat) teknis	Sumber nutrisi P
18.	Larutan Susu kapur	Menjaga pH

Perlakuan penambahan nutrisi P menggunakan asamfosfat teknis (H_3PO_4) dengan konsentrasi berdasarkan massa sebesar 85 % dengan nilai BJ 1,71 g/l. Berat unsur P dalam H_3PO_4 adalah 31/98 samadengan 0,316, sehingga perhitungan volume penambahan nutrisi P adalah sebagai berikut:

$$\text{Volume } H_3PO_4 = \frac{(S_o / a)}{(1,71)(0,85)(0,36)} \times b$$

dimana volume H_3PO_4 adalah volume yang ditambahkan (ml)

S_o adalah konsentrasi COD influen (mg/l)

a adalah konsentrasi rasio COD:P yang diuji (300, 200 dan 100) (mg/l)

b adalah volume limbah influen (l)

3.7. Teknik Pengambilan Sampel

Limbah cair industri PT. Rimba Partikel Indonesia diambil dari bak ekualisasi IPAL, dengan maksud agar kondisi limbah dalam keadaan seragam baik pH, konsentrasi, temperatur dan sebagainya. Selanjutnya pengamatan limbah di Laboratorium dilakukan dengan mengambil sampel dari titik influen dan efluen reaktor setiap hari (24 jam) selama 10 hari untuk setiap variasi penelitian. Pengamatan dilakukan dalam kondisi yang dianggap *steady state*, yang dalam penelitian ini lamanya adalah satu kali waktu tinggal.

3.8. Teknik Analisis Data

3.8.1. Analisis Pendahuluan

Analisis pendahuluan meliputi pengamatan ratio BOD_5 / COD untuk mengetahui sifat biodegradabilitas limbah organik. Bila limbah bersifat biodegradable dengan konsentrasi COD yang cukup tinggi (lebih dari 1000 mg/L), maka dapat dilakukan pengolahan dengan proses anaerob. Karakteristik limbah lainnya yang perlu diketahui meliputi konsentrasi BOD, N total, P total, Phenol dan Ammonia. Parameter-parameter tersebut dianalisa dengan prosedur sesuai Standard Methods.

3.8.2. Analisis COD

Analisis COD terlarut didahului dengan pembuatan reagen COD (larutan Standar Kalium dikromat, Larutan Standar FAS, Indikator Ferroin, Larutan Asam Sulfat-Silver Sulfat), Standardisasi FAS, Larutan Blanko. Limbah cair disaring dan diambil sebanyak 5 ml, kemudian diencerkan menjadi 50 ml dalam gelas ukur. Ambil 2 ml sampel dan 2 ml blanko dalam tabung COD. Tambahkan $HgSO_4$ 1 sendok kecil, kalium dikromat 1 cc dan larutan asam sulfat – silver sulfat 3 cc. Larutan tersebut dipanaskan 2 jam dengan suhu $170\ ^\circ C$, kemudian didinginkan selama 30 menit, kemudian ditambah aquadest 8 cc dan indikator ferroin 2 – 3 tetes dalam Erlenmeyer. Selanjutnya dilakukan titrasi dengan Ferro Ammonium Sulfat (ferroin) hingga warna hijau perlahan menjadi warna merah bata. Konsentrasi COD dihitung dengan persamaan :

$$COD \text{ (mg O}_2\text{/l)} = \frac{(a - b) \times N \times 8000}{\text{ml sampel}} \quad (3.1)$$

dimana a = volume FAS yang digunakan untuk titrasi blanko

b = volume FAS yang digunakan untuk titrasi sampel

N = normalitas larutan FAS

3.8.3. Analisis BOD

Pembuatan Reagen BOD didahului dengan menyiapkan reagen berupa larutan buffer Phosphat, larutan Magnesium sulfat, larutan kaliumklorida, larutan feri klorida dan indikator amilum. Larutan pentiter adalah NTS (natrium thio sulfat).

Analisis BOD dilakukan dengan mengambil limbah sebanyak 5 ml lalu diencerkan menjadi 1000 ml dalam labu ukur 1 l dan dituangkan dalam botol BOD. Kemudian ditambahkan FeCl_3 , CaCl_2 , MgSO_4 dan buffer phosphat masing-masing 1 ml dan diaduk sampai homogen. Setelah itu ditambahkan Alkali Iodine, MnSO_4 dan H_2SO_4 masing-masing 2 ml. Kemudian larutan dituangkan dalam beaker glass 600 cc diberi indikator amylum 2 – 3 tetes saja, baru dititrasi dengan NTS sampai menjadi warna biru jernih. Untuk BOD_5 prosedurnya sama dengan BOD_0 . Konsentrasi BOD dihitung dengan persamaan :

$$\text{BOD (mg O}_2\text{/l)} = a \times N \times \frac{1000}{\text{Vol Botol}} \times P \quad (3.2)$$

Dimana a = volume NTS yang digunakan untuk titrasi blanko

N = normalitas larutan NTS

P = pengenceran

3.8.4. Analisa VSS

Sampel dalam cawan diuapkan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C, sampai beratnya konstan. Berat residu dalam cawan adalah zat padat total. Residu yang dihasilkan dipanaskan didalam furnace pada suhu 550 °C, selama 15 – 20 menit. Setelah furnace kembali ke suhu kamar, cawan didinginkan dalam desikator selama 30 – 60 menit, lalu ditimbang dengan cepat. Kemudian VSS dihitung sebagai berikut:

$$VSS = \frac{(b - a) \times 1000}{c} \text{ mg/l} \quad (3.3)$$

b = berat cawan dan residu sebelum pembakaran 550 °C, namun sesudah pemanasan 105 °C (mg)

a = berat cawan dan residu sesudah pembakaran 550 °C (mg)

c = volume sample (ml)

3.8.5. Analisa pH

pH diukur menggunakan Universal Indicator pH. pH dijaga agar tetap pada kisaran 7 – 8. Apabila kondisi mixed liquor asam maka ditambahkan susu kapur (CaCO₃) atau NaOH. Bila kondisi basa maka ditambahkan H₂SO₄.

3.8.6. Analisa Temperatur

Pengamatan temperatur dilakukan menggunakan termometer. Kondisi temperatur dalam reaktor anaerobik dijaga dalam kisaran mesofilik antara 20 - 40 °C.

3.9. Model Persamaan Kinetika Reaksi

Kompleksitas proses anaerob membuat permodelan agak sulit dilakukan, sehingga model laju pengolahan limbah didekati dengan persamaan kesetimbangan substrat pada proses pertumbuhan tersuspensi. Permodelan disusun dengan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. pengamatan dilakukan pada kondisi yang dianggap *steady state*.
2. Reaksi berlangsung seragam pada semua titik, laju pembentukan dan penguraian intermediate sama, meskipun konsentrasi reaktan dan produk selalu berubah.

Konversi dari asam volatil menjadi metan dan karbon dioksida dinyatakan dengan simplifikasi reaksi sebagai berikut :



Penyusunan model persamaan laju biodegradasi limbah didasarkan pada persamaan umum neraca substrat untuk reaktor tersuspensi tanpa pengembalian (*recycle*) sebagaimana persamaan (2.2). Model persamaan laju biodegradasi limbah cair secara anaerob selanjutnya disusun dengan pendekatan persamaan Monod. Persamaan Monod (2.3) dipilih sebagai pendekatan karena dipandang lebih praktis dan sederhana dibandingkan dengan persamaan Michaelis-Menten yang harus menghitung nilai konstanta-konstanta reaksi enzimatik secara individual.

$$V \frac{dS_e}{dt} = QS_o - QS_e + rsV = 0 \quad (2.2)$$

$$rs = -\frac{Q(S_o - QS_e)}{V} = -\frac{(S_o - S_e)}{\theta d} = -\rho \quad (2.3)$$

Selanjutnya laju pengolahan limbah (ρ) dapat didekati dengan menggunakan persamaan Monod sebagaimana persamaan (2.7) atau (2.8).

$$rs = -\rho = -\frac{kX_v Se}{K + Se} \quad (2.7)$$

$$rs = -\rho = -\frac{kSe}{K + Se} \quad (2.8)$$

Penyelesaian dengan menggunakan persamaan (2.7) dan (2.8) dibandingkan untuk mendapatkan model persamaan yang lebih sesuai. Model persamaan (2.7) dan (2.8) selanjutnya disubstitusikan pada persamaan (2.3) sehingga didapatkan persamaan (2.9) dan (2.10).

$$\frac{X_v}{\rho} = -\frac{X_v \theta d}{(S_o - S_e)} = \frac{K}{k} \frac{1}{Se} + \frac{1}{k} \quad (2.9)$$

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\theta d}{(S_o - S_e)} = \frac{K}{k} \frac{1}{Se} + \frac{1}{k} \quad (2.10)$$

Selanjutnya persamaan (2.9) dan (2.10) dibandingkan untuk mendapatkan model persamaan yang terbaik dalam arti lebih sesuai untuk pendugaan laju biodegradasi limbah. Model yang lebih baik dapat ditentukan dengan menggunakan metode Lineweaver-Burke plot secara regresi antara nilai variable y (yaitu X_v/ρ dan $1/\rho$) dan x (yaitu $1/Se$). Nilai R^2 (koefisien determinasi) regresi kedua persamaan itu dibandingkan, nilai yang lebih besar dipilih menjadi model persamaan laju biodegradasi. Setelah diperoleh persamaan regresi dari model persamaan yang terpilih, maka nilai k dan K dapat dihitung berdasarkan intersep dan slope regresi.

3.10. Analisa Statistik

Analisa statistik yang digunakan untuk hipotesa pertama dan kedua yaitu membandingkan pengaruh dari perlakuan pengolahan terhadap penurunan konsentrasi COD adalah Oneway ANOVA (Supranto, 2001). ANOVA dipergunakan untuk menguji hipotesis perbedaan lebih dari 2 rata-rata perlakuan. Dalam pengujian ini diasumsikan bahwa masing-masing set data berasal dari populasi dengan distribusi normal. Jika nilai F hitung lebih kecil atau samadengan nilai F kritis pada signifikansi 95 %, maka pengaruh perlakuan tersebut terhadap efisiensi penurunan konsentrasi COD berbeda nyata atau dengan kata lain H_0 diterima. Jika nilai F hitung lebih besar dari nilai F kritis, maka H_0 ditolak atau H_1 diterima.

Dalam penyusunan model persamaan laju biodegradasi limbah dilakukan beberapa pengujian statistik. Pemodelan diawali dengan menentukan pilihan model yang lebih baik antara persamaan (2.9) dan (2.10). Ini dilakukan dengan membuat grafik plot hubungan pada persamaan (2.9) antara nilai Xv/ρ pada sumbu y dengan nilai $1/Se$ pada sumbu x dan dicari nilai koefisien determinannya (nilai R^2). Kemudian dibuat lagi grafik plot hubungan pada persamaan (2.10) antara nilai $1/\rho$ pada sumbu y dengan nilai $1/Se$ pada sumbu x dan dicari nilai koefisien determinasi (R^2). Menurut Supranto (2001) nilai R^2 merupakan nilai untuk mengukur besarnya kontribusi variasi nilai x terhadap variasi nilai y. Variasi y lainnya (sisaannya) disebabkan oleh faktor lain yang juga mempengaruhi y dan sudah termasuk dalam kesalahan pengganggu (*disturbance error*). Kedua nilai R^2 tersebut dibandingkan dan nilai yang

lebih tinggi menunjukkan bahwa nilai y dapat ditentukan oleh nilai x dengan lebih baik, sehingga dipakai untuk menentukan model yang terpilih.

Tahap berikutnya adalah menentukan nilai k dan K dari model persamaan yang terpilih dengan perhitungan bahwa intersep persamaan yang terpilih adalah sama dengan nilai $1/k$. Sedangkan koefisien persamaan yang terpilih dari plot hubungan y dan x pada tahap sebelumnya adalah sama dengan besarnya K/k . Dengan demikian nilai k dan K dapat diketahui.

Setelah nilai k dan K diketahui dapat disusun persamaan laju biodegradasi limbah. Persamaan tersebut kemudian perlu divalidasi untuk mengetahui keakuratan fungsinya dengan pengujian secara statistik dengan uji χ^2 . Menurut Supranto (2001:161) distribusi kai-kuadrat (χ^2) dapat digunakan sebagai kriteria untuk pengujian ketepatan penerapan suatu fungsi (*test goodness of fit*) untuk data hasil observasi atau data empiris. Dalam pengujian ini, akan dibandingkan antara frekuensi hasil observasi (*observed frequency*) dengan frekuensi harapan (*expected frequency*), yang biasanya dinyatakan sebagai suatu fungsi tertentu. Fungsi ini mengikuti fungsi kai-kuadrat dengan derajat kebebasan ($k-N$), dimana k adalah banyaknya kejadian dan N adalah banyaknya kuantitas dari hasil observasi untuk menghitung frekuensi harapan. Untuk fungsi normal, apabila tidak diperlukan estimasi parameter populasi untuk memperoleh frekuensi harapan maka derajat kebebasannya adalah $(k-1)$.

Apabila hasil uji χ^2 menunjukkan nilai $\chi^2 \leq \chi^2$ tabel, maka persamaan tersebut dapat digunakan sebagai pendekatan atau model persamaan laju biodegradasi limbah atau H_0 diterima. Sebaliknya apabila hasil uji χ^2 menunjukkan nilai $\chi^2 > \chi^2$ tabel, maka persamaan tersebut tidak dapat digunakan sebagai pendekatan atau model persamaan laju biodegradasi limbah atau H_0 ditolak. Kriteria uji pada tingkat kepercayaan dihitung sebagai berikut:

$$\chi^2 = \sum_{r=1}^n \frac{(\text{nilaiobservasi} - \text{nilai model})^2}{\text{nilai model}} \quad (3.5)$$

3.11. Jadwal Pelaksanaan

Jadwal kegiatan penelitian dapat dilihat pada Tabel 6 berikut ini :

Tabel 6. Jadwal Kegiatan Penelitian

No.	Kegiatan	Maret	April	Mei	Juni	Juli	Agst
1.	Penelitian Pendahuluan		X				
2.	Pengumpulan Data		X	X	X		
3.	Pembimbingan	X	X	X	X	X	X
4.	Penyusunan tesis				X		
5.	Seminar Hasil					X	
6.	Penyempurnaan tesis					X	X
7.	Ujian Tesis						X

BAB IV.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakteristik Limbah Cair

Uji pendahuluan dilakukan untuk mengetahui karakteristik limbah cair industri papan partikel. Hasil uji pendahuluan tersebut dapat dilihat pada Tabel 7 dibawah ini.

Tabel 7. Karakteristik limbah cair industri

No.	Parameter	Nilai
1.	BOD	533 mg/l
2	COD	1550 mg/l
3	N Total	629,2 mg/l
4	P total	1,666 mg/l
5	Phenol	0,013 mg/l
6	NH ₃ -N	11,92 mg/l

Limbah cair PT. Rimba Partikel Indonesia bersumber dari kegiatan pencucian alat-alat pencampur pekat, yang mengandung serbuk kayu dan bahan-bahan kimia, seperti urea formaldehyde, fenol formaldehyde, dan melamin formaldehyde, pengeras (hardener) dan emulsifier. Dari hasil analisa pendahuluan untuk mengetahui sebagaimana pada Tabel 7 dapat diketahui rasio BOD/COD limbah sebesar $533/1550 = 0,34$. Nilai ini menunjukkan limbah cair industri papan partikel bersifat biodegradable (Alaerts, G dan Sri Sumestri, SS, 1984), sehingga limbah cair dapat diolah secara biologis. Dengan nilai COD 1550 mg/l,

maka limbah tersebut dapat diolah melalui proses anaerob. Hal ini sejalan dengan pendapat Droste (1997) bahwa batas minimum konsentrasi COD influen untuk mencapai keberhasilan pengolahan anaerob adalah 1000 mg/l, meskipun beberapa penelitian menunjukkan keberhasilan pengolahan pada konsentrasi COD yang lebih rendah. Dengan proses anaerob diharapkan senyawa-senyawa organik kompleks akan terurai menjadi senyawa sederhana.

Senyawa organik merupakan sumber karbon bagi mikroba heterotrof (Hendarko S, et al, 2002). Lebih lanjut dikemukakan bahwa mikroba anaerob menggunakan senyawa organik sebagai aseptor elektron dalam proses oksidasi biologinya. Selain itu senyawa organik diperlukan sebagai faktor tumbuh, yaitu bahan penyusun sel. Faktor tumbuh tidak dapat disintesis dari sumber karbon sederhana dan hanya diperlukan dalam jumlah yang sangat sedikit. Dengan nilai COD influen sebesar 1550 mg/l menunjukkan kandungan senyawa organik yang cukup tinggi dalam limbah, sehingga ketersediaan bahan organik sebagai sumber karbon, sumber energi, aseptor elektron dan faktor tumbuh dalam proses bioenergi bagi mikroba telah tercukupi.

Unsur-unsur seperti karbon, oksigen, hidrogen dan fosfor merupakan unsur-unsur penyusun utama sel. Konsentrasi N Total dalam limbah cukup tinggi yaitu 629,2 mg/l, diduga bersumber dari kandungan urea dalam perekat. Sebaliknya konsentrasi P total dalam limbah menurut analisa sebesar 1,666 mg/l, sehingga bila kebutuhan nutrisi terbatas bagi mikroba dalam proses anaerob adalah rasio COD:N:P= 300:5:1, maka dengan nilai COD sekitar 1550 mg/l unsur N bukan merupakan hara terbatas, sehingga tidak perlu ditambahkan dalam perlakuan variasi nutrisi dalam penelitian ini, sedangkan unsur P perlu ditambahkan untuk dapat memenuhi kebutuhan unsur makro bagi mikroba.

Mineral sangat dibutuhkan oleh mikroba dan jasad hidup yang lain karena berfungsi sebagai pengatur tekanan osmose, permeabilitas dan sebagai kofaktor dari beberapa enzim (Hendarko, Set al, 2002). Kebutuhan mineral dalam jumlah relatif besar seperti K, Ca, Mg, Na, S dan Cl serta mineral yang dibutuhkan dalam jumlah yang sangat sedikit seperti Fe, Zn, Cu, Mo, Bo dan Al diduga telah terpenuhi karena limbah cair juga mengandung serbuk kayu yang tersusun dari berbagai mineral yang diperlukan oleh mikroba. Oleh karena itu dalam penelitian ini penambahan mineral tidak dilakukan.

Kandungan senyawa phenol yang bersumber dari perekat phenol formaldehida sebesar 0,013 mg/l, nilai ini sesungguhnya relatif kecil. Namun sifat phenol yang beracun dapat merusak sel sehingga diduga dapat mempengaruhi kehidupan mikroba.

4.2. Pengaruh Waktu Tinggal Terhadap Efisiensi Penurunan COD

Dalam proses pengolahan anaerob pengendalian waktu tinggal memegang peranan penting. Waktu tinggal padatan (solid retention time atau SRT) merupakan waktu rata-rata untuk suatu partikel solid tinggal dalam reaktor. Menurut Droste (1997), dalam reaktor pertumbuhan tersuspensi tanpa pengembalian (*recycle*), SRT sama dengan HRT (*hydraulic retention time*). Suatu SRT minimum harus dijaga sedemikian untuk memungkinkan mikroorganisme bereproduksi sebelum keluar dan terbuang dari sistem. Pengaruh waktu tinggal terhadap efisiensi penurunan COD pada perlakuan waktu tinggal 2 hari, 3 hari dan 4 hari dapat dilihat pada Tabel 8, 9 dan 10 dibawah ini.

Tabel 8. Pengaruh waktu tinggal 2 hari terhadap efisiensi penurunan COD

Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD efluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1502	856	43,04
2	1519	759	50,00
3	1513	756	50,00
4	1504	583	61,25
5	1467	546	62,82
6	1485	564	62,03
7	1471	607	58,75
8	1429	513	64,10
9	1431	530	62,96
10	1571	589	62,50

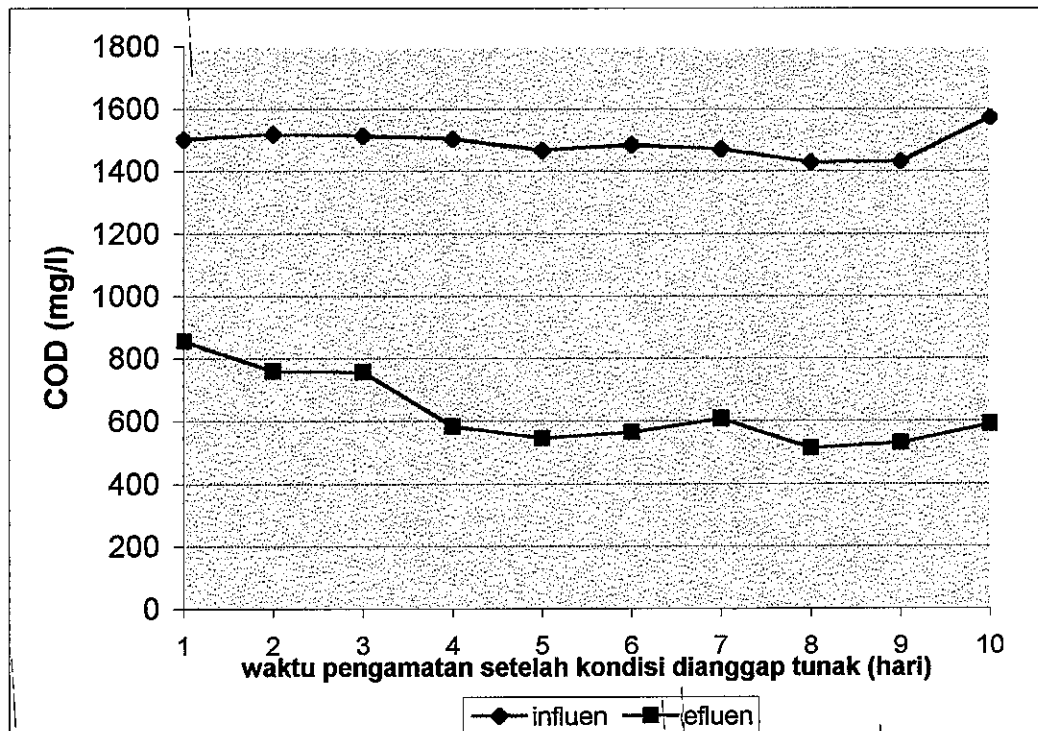
Tabel 9. Pengaruh waktu tinggal 3 hari terhadap efisiensi penurunan COD

Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD efluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1479	799	45,95
2	1516	698	53,95
3	1454	598	58,90
4	1210	456	62,30
5	1172	449	61,67
6	1200	445	62,90
7	1243	474	61,90
8	1172	449	61,67
9	1202	465	61,29
10	1227	479	60,94

Tabel 10. Pengaruh waktu tinggal 4 hari terhadap efisiensi penurunan COD

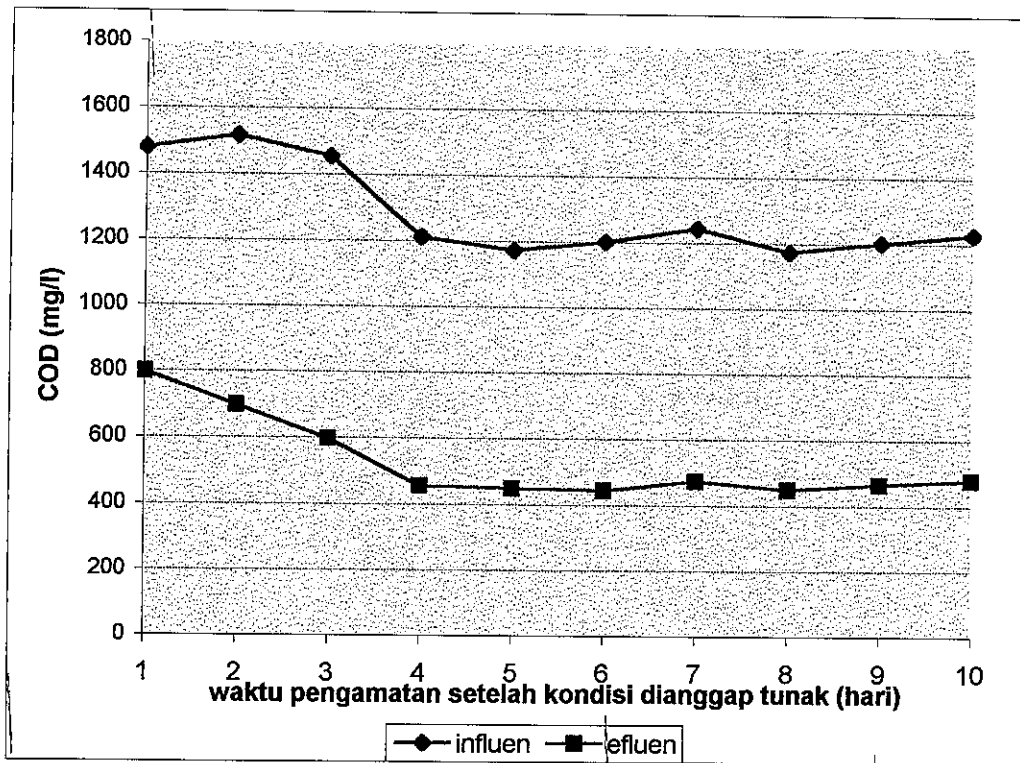
Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD efluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1509	754	50,00
2	1488	606	59,30
3	1512	533	64,77
4	1370	428	68,75
5	1348	427	68,35
6	1432	443	69,05
7	1387	436	68,57
8	1366	435	68,12
9	1324	415	68,66
10	1361	454	66,67

Hasil penelitian kinerja reaktor anaerob dengan variasi waktu tinggal 2 hari, 3 hari, dan 4 hari menunjukkan trend penurunan COD influen dan efluen sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6, 7 dan 8. Gambar 6, 7 dan 8 menunjukkan bahwa nilai COD influen maupun efluen masih fluktuatif dalam beberapa hari pertama waktu pengamatan, meskipun pengamatan baru dimulai setelah kondisi dianggap tunak, yaitu satu kali waktu tinggal. Hal ini menunjukkan bahwa untuk setiap pergantian variasi penelitian menyebabkan perubahan kondisi reaktor yang menyebabkan kondisi menjadi *unsteady state*, sehingga dibutuhkan waktu yang cukup panjang bagi mikroba untuk menyesuaikan dengan kondisi yang baru.

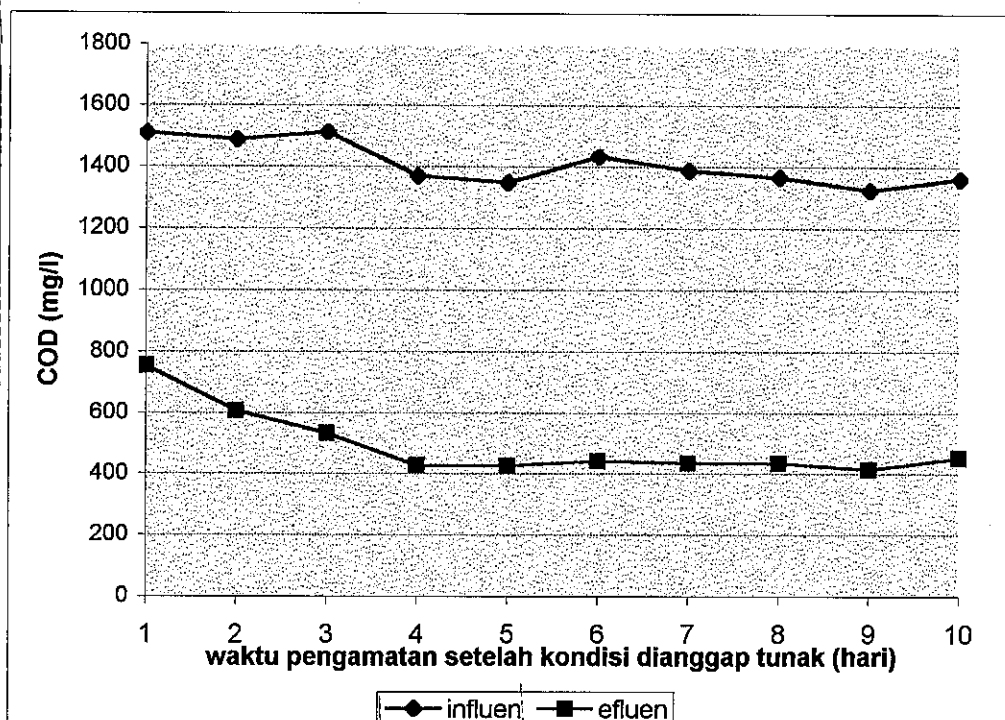


Gambar 6. Konsentrasi COD pada waktu tinggal 2 hari

Pada Gambar 6 terlihat bahwa konsentrasi efluen pada variasi waktu tinggal 2 hari masih berfluktuasi hingga hari ke 10 waktu pengamatan. Sedangkan pada waktu tinggal 3 hari sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 dan waktu tinggal 4 hari sebagaimana pada Gambar 8 konsentrasi efluen cenderung stabil setelah hari keempat. Hal ini juga ditunjukkan pada Gambar 9 dimana efisiensi penurunan COD pada waktu tinggal 3 dan 4 hari cenderung stabil mulai hari keempat.



Gambar 7. Konsentrasi COD pada waktu tinggal 3 hari



Gambar 8. Konsentrasi COD pada waktu tinggal 4 hari

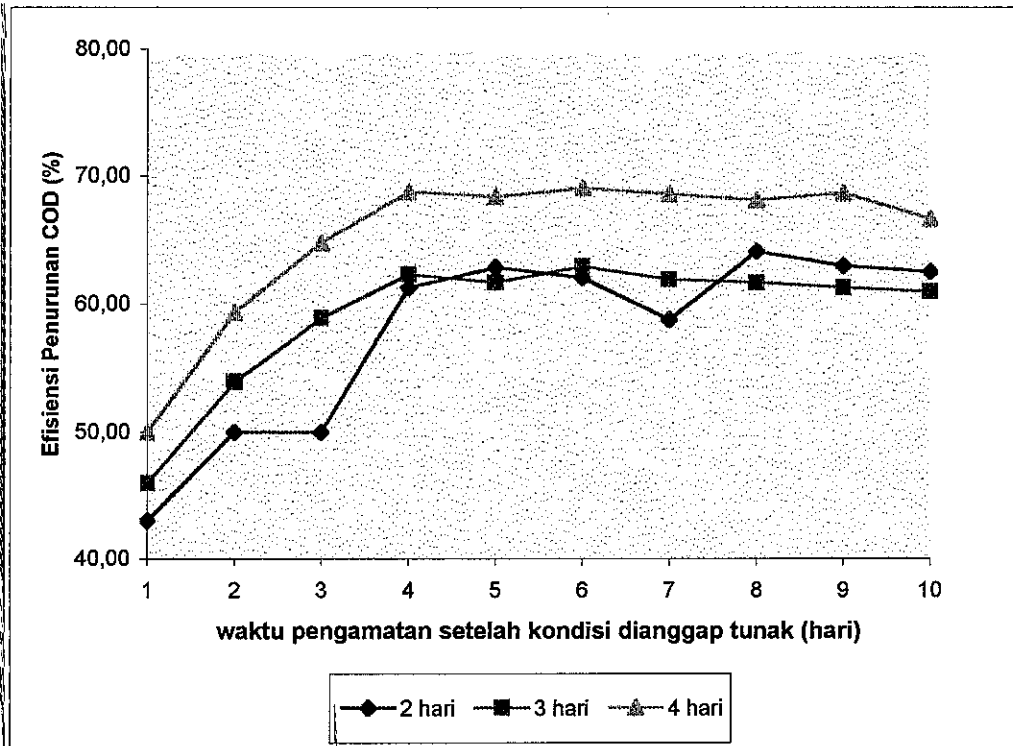
Pada pengolahan dengan waktu tinggal 2 hari nilai COD influen rata-rata 1489 mg/l dan efluen rata-rata 630 mg/l. Uji statistik dengan T-test nilai COD antara influen (sebelum diolah) dan efluen (setelah diolah) sebagaimana pada Lampiran 2 menunjukkan nilai korelasi 0,47 dengan signifikansi 0,170. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan waktu tinggal 2 hari tidak berpengaruh terhadap nilai COD efluen.

Pada waktu tinggal 3 hari nilai COD influen rata-rata 1287 mg/l dan efluen rata-rata 537 mg/l. Uji statistik dengan T-test nilai COD antara influen (sebelum diolah) dan efluen (setelah diolah) menunjukkan nilai korelasi 0,94 dengan signifikansi 0,000. Dengan demikian nilai COD influen dan efluen mempunyai korelasi yang kuat.

Pada waktu tinggal 4 hari nilai COD influen rata-rata 1409 mg/l dan efluen rata-rata 493 mg/l. Uji statistik dengan T- test nilai COD antara influen (sebelum diolah) dan efluen (setelah diolah) menunjukkan nilai korelasi 0,82 dengan signifikansi 0,004. Hal ini menunjukkan bahwa nilai COD influen dan efluen mempunyai korelasi yang cukup kuat pada perlakuan waktu tinggal 4 hari.

Perbandingan efisiensi penurunan COD pada waktu tinggal 2 hari, 3 hari dan 4 hari dapat dilihat pada Gambar 9. Gambar 9 menunjukkan bahwa efisiensi penurunan COD meningkat sejalan dengan bertambah lamanya waktu tinggal. Hal ini karena waktu tinggal yang cukup lama memberi kesempatan kontak yang lebih besar bagi mikroba untuk mendegradasi limbah. Pada waktu tinggal 2 hari efisiensi penurunan COD menunjukkan fluktuasi yang cukup besar dibandingkan pada waktu tinggal 3 hari dan 4 hari. Waktu tinggal 2 hari menyebabkan laju

aliran (*flow rate*) lebih cepat, sehingga memungkinkan mikroba ikut tercuci keluar sebelum mengalami pertumbuhan jumlah yang cukup, sehingga degradasi limbah berfluktuasi.



Gambar 9. Efisiensi Penurunan COD pada waktu tinggal 2 hari, 3 hari dan 4 hari

Uji statistik dengan Oneway ANOVA menunjukkan bahwa efisiensi penurunan COD berbeda nyata pada berbagai variasi waktu tinggal, ini dibuktikan dengan nilai F hitung 4,209 yang lebih besar dari F kritis 3,35 pada tingkat signifikansi 95 %. Efisiensi penurunan COD dengan variasi waktu tinggal 4 hari berbeda nyata dengan variasi 3 hari maupun 2 hari pada tingkat signifikansi 90 %. Sedangkan variasi waktu tinggal 3 hari tidak berbeda nyata dengan variasi 2 hari. Rata-rata efisiensi penurunan COD pada variasi waktu tinggal 4 hari sebesar 65,22 %, sedangkan waktu tinggal 3 hari sebesar 58,68 % dan 2 hari sebesar 57,75 %. Hal ini menunjukkan bahwa waktu tinggal berbanding lurus dengan efisiensi

penurunan COD. Semakin lama waktu tinggal mempengaruhi kesempatan kontak yang lebih besar antara mikroba anaerob dengan limbah, sehingga degradasi limbah organik meningkat. Dengan demikian waktu tinggal 4 hari digunakan dalam penentuan *flow rate* untuk pengujian berikutnya, yaitu pengaruh variasi nutrisi (*limiting substrat*).

4.3. Pengaruh Nutrien Terbatas Terhadap Efisiensi Penurunan COD

Pengaruh nutrisi terbatas terhadap efisiensi penurunan COD dapat dilihat pada Tabel 11, 12, 13 dan 14 berikut ini. Tabel 11, 12, 13 dan 14 menunjukkan berturut-turut data pengaruh variasi kontrol (tidak diberi penambahan nutrisi), rasio COD:P = 300:1,200:1 dan 100:1 terhadap efisiensi

Tabel 11. Pengaruh variasi nutrisi kontrol (tidak diberi perlakuan nutrisi) terhadap efisiensi penurunan COD

Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD effluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1509	754	50,00
2	1488	606	59,30
3	1512	533	64,77
4	1370	428	68,75
5	1348	427	68,35
6	1432	443	69,05
7	1387	436	68,57
8	1366	435	68,12
9	1324	415	68,66
10	1361	454	66,67

Tabel 12. Pengaruh rasio COD:P = 300:1 terhadap efisiensi penurunan COD

Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD efluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1598	631	60,49
2	1659	533	67,86
3	1617	453	71,95
4	1594	453	71,60
5	1575	433	72,50
6	1534	413	73,08
7	1531	412	73,08
8	1539	429	72,15
9	1457	389	73,33
10	1489	406	72,73

Tabel 13. Pengaruh rasio COD:P = 200:1 terhadap efisiensi penurunan COD

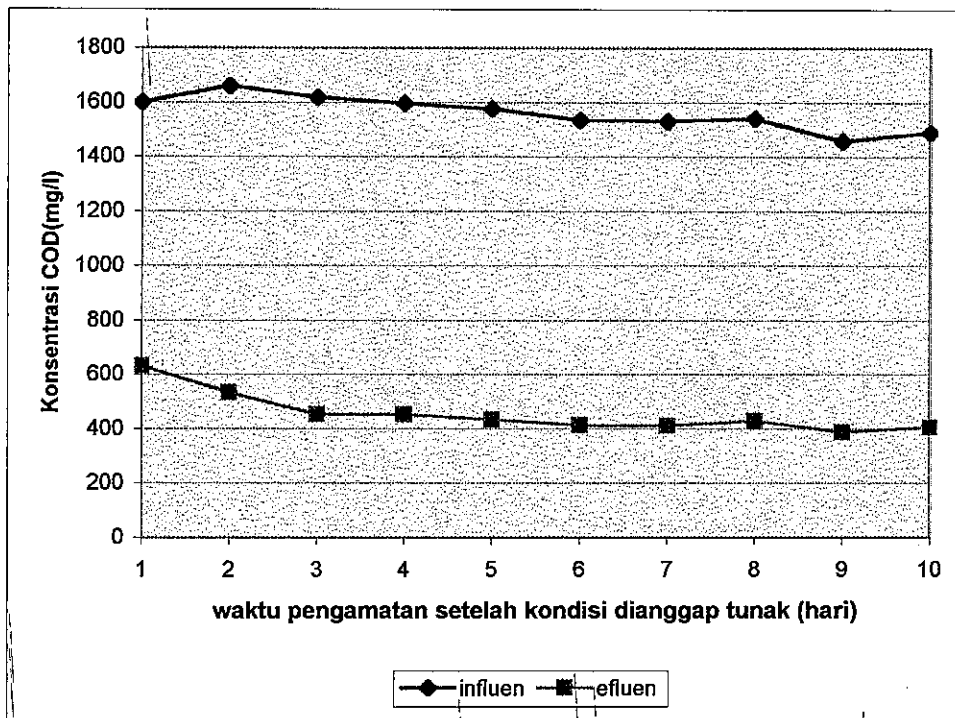
Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD efluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1585	677	57,32
2	1683	600	64,37
3	1602	579	63,86
4	1581	540	65,85
5	1559	481	69,14
6	1519	423	72,15
7	1537	442	71,25
8	1516	460	69,62
9	1517	442	70,89
10	1512	440	70,89

Tabel 14. Pengaruh rasio COD:P = 100:1 terhadap efisiensi penurunan COD

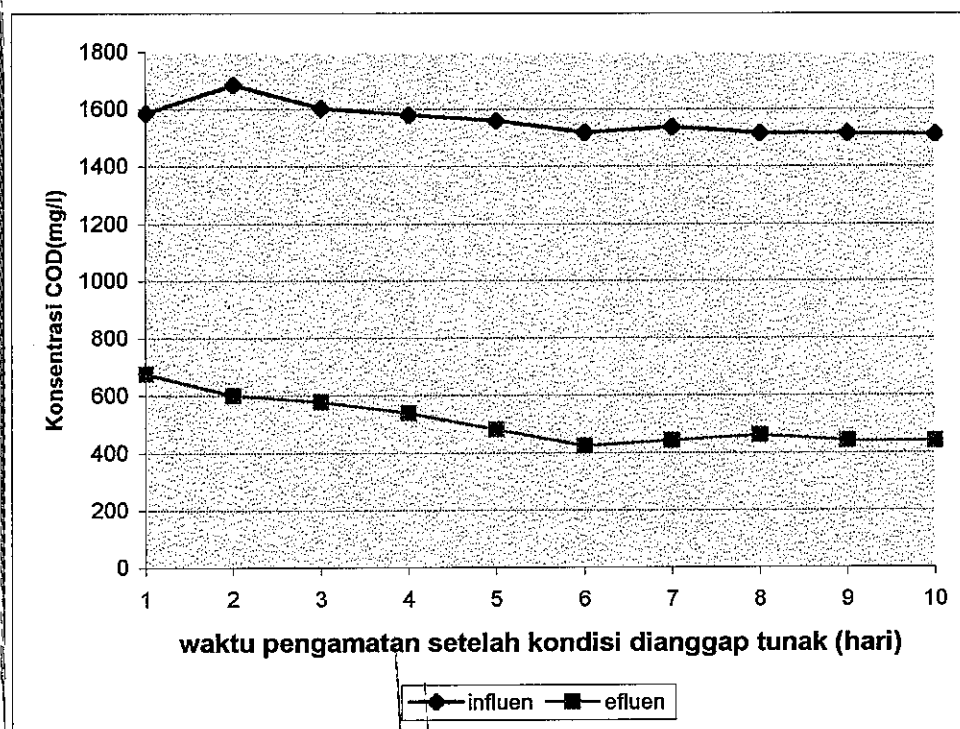
Waktu Pengamatan (hari)	COD influen (mg/l)	COD efluen (mg/l)	Efisiensi (%)
1	1565	679	56,63
2	1580	640	59,52
3	1598	583	63,53
4	1612	525	67,44
5	1565	500	68,05
6	1552	480	69,05
7	1516	481	68,29
8	1477	480	67,50
9	1422	443	68,83
10	1480	464	68,67

Kinerja reaktor anaerob pada variasi nutrien rasio COD:P= 300:1, 200:1, dan 100:1, dengan waktu tinggal 4 hari, menunjukkan trend penurunan COD influen dan efluen sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10, 11 dan 12. Sedangkan efisiensi pada perlakuan kontrol (tanpa perlakuan penambahan nutrien dengan waktu tinggal 4 hari) ditunjukkan pada Gambar 8. Gambar 10 menunjukkan bahwa konsentrasi COD efluen pada variasi nutrien dengan rasio COD:P= 300:1 telah mulai stabil pada hari ketiga pengamatan setelah kondisi dianggap tunak. Sedangkan pada rasio COD:P = 200:1 dan 100:1 pada Gambar 11 dan 12 menunjukkan bahwa konsentrasi COD efluen mulai stabil pada hari kelima.

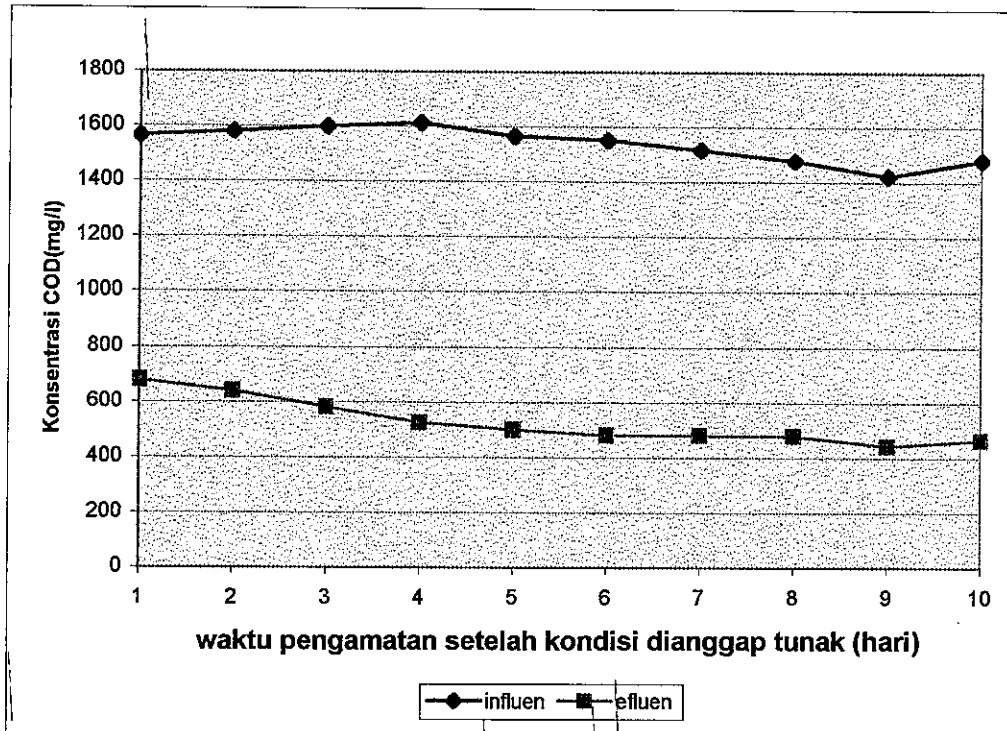
Efisiensi penurunan COD pada variasi COD:P = 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol ditunjukkan pada Gambar 13.



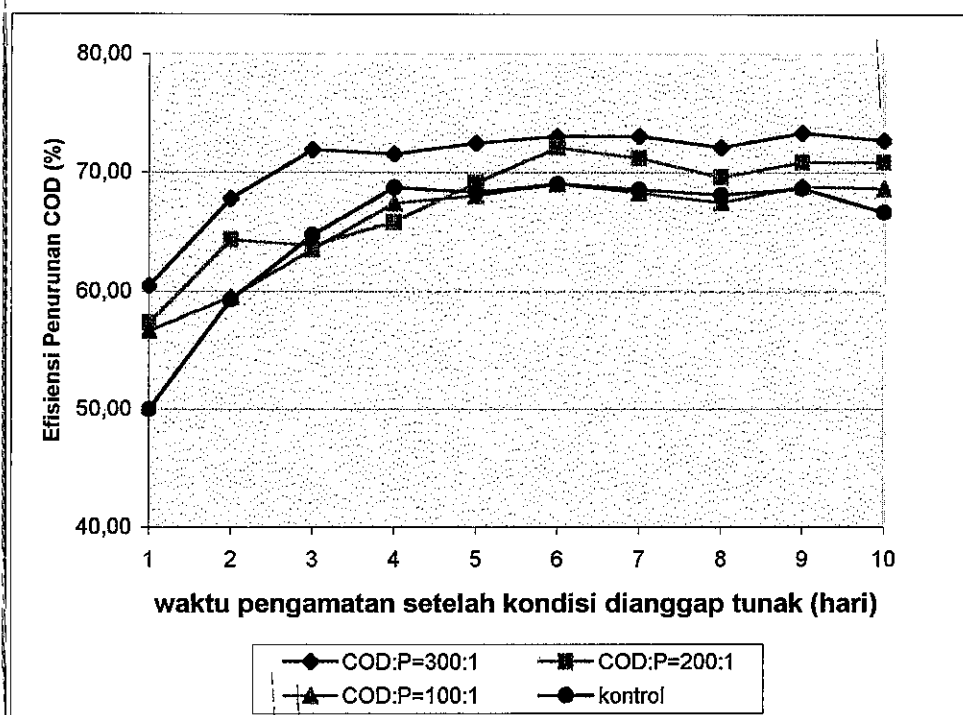
Gambar 10. Konsentrasi COD pada variasi COD:P = 300:1



Gambar 11. Konsentrasi COD pada variasi COD:P = 200:1



Gambar 12. Konsentrasi COD pada variasi COD:P = 100:1



Gambar 13. Efisiensi Penurunan COD pada variasi COD:P = 300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol

Grafik yang ditampilkan pada Gambar 13 menunjukkan bahwa variasi rasio COD:P= 300:1 menghasilkan efisiensi penurunan COD yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan variasi rasio lainnya. Sampai hari ketiga pengamatan dengan rasio COD:P=300:1 grafik masih menunjukkan adanya peningkatan efisiensi, namun setelah hari ketiga efisiensi yang dihasilkan relatif lebih stabil dan lebih tinggi dibandingkan variasi rasio lainnya.

Hasil uji statistik dengan Oneway ANOVA menunjukkan bahwa efisiensi penurunan COD pada waktu tinggal 4 hari berbeda nyata antar berbagai variasi nutrien, ditunjukkan dengan nilai F hitung 2,766 yang lebih besar dari F tabel 2,28 pada tingkat signifikansi 90 %. Variasi rasio COD:P=300:1 menghasilkan efisiensi rata-rata tertinggi yaitu 70,88 %, sedangkan pada rasio 200:1 sebesar 67,53 %, pada rasio 100:1 sebesar 65,75 % dan kontrol sebesar 65,22 %.

Bila dibandingkan antar variasi nutrien, efisiensi penurunan COD pada variasi rasio COD:P= 300:1 berbeda nyata dengan efisiensi penurunan COD pada rasio 100:1 dan kontrol. Namun efisiensi penurunan COD pada rasio COD:P=300:1 tidak berbeda nyata dengan variasi 200:1 pada tingkat signifikansi 90 %. Hal ini disebabkan karena pada variasi rasio 300:1 kebutuhan hara terbatas bagi mikroba telah terpenuhi sehingga dapat dimanfaatkan secara maksimal oleh mikroba. Kondisi ini menyebabkan mikroba anaerob dapat menghasilkan efisiensi penurunan COD yang berarti. Pada variasi rasio COD:P=200:1 ketersediaan unsur P yang semakin tinggi bukannya menghasilkan peningkatan efisiensi, bahkan sebaliknya mengakibatkan penurunan efisiensi meskipun penurunan ini sesungguhnya tidak berbeda nyata dengan rasio COD:P = 300:1 pada tingkat signifikansi 90 %. Pada variasi rasio COD:P= 100:1 ketersediaan unsur P mulai berlebihan, sehingga menyebabkan penurunan efisiensi yang cukup berarti pada

tingkat signifikansi 90 %. Dengan demikian dari segi efisiensi biaya dan efisiensi pengolahan disarankan agar digunakan perlakuan nutrisi dengan rasio COD:P= 300:1 dan waktu tinggal 4 hari.

Efisiensi penurunan COD pada perlakuan pemberian nutrisi dengan rasio COD:P=300:1 lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Hal ini sejalan dengan pendapat Droste (1997) yang mengemukakan bahwa kebutuhan nutrisi bagi mikroba anaerob umumnya pada rasio COD:N:P= 300:5:1. Pada rasio tersebut kebutuhan hara terbatas bagi mikroba anaerob dapat terpenuhi, sehingga dimanfaatkan secara maksimal oleh mikroba. Dengan terpenuhinya kebutuhan nutrisi terbatas, mikroba memiliki cukup energi untuk mendegradasi limbah.

Efisiensi yang dicapai pada rasio COD:P= 300:1 dengan waktu tinggal 4 hari, yaitu 70,88 %, sesungguhnya relatif tidak begitu tinggi diduga karena adanya beberapa inhibitor, seperti konsentrasi ammonia yang cukup tinggi dan kehadiran senyawa phenol maupun formaldehyde yang bersumber dari campuran perekat dalam limbah. Hasil analisa menunjukkan bahwa konsentrasi ammonia sebesar 11,92 mg/l pada limbah, nilai ini relatif tinggi dibandingkan dengan baku mutu efluen yang ditentukan dalam Keputusan Gubernur Jawa Tengah Nomor 660.1/02/1997 untuk N sebagai ammonia sebesar 4,0 mg/l. Hasil uji konsentrasi phenol pada limbah sebesar 0,013 mg/l memang masih dibawah batas maksimum baku mutu efluen limbah cair untuk industri papan partikel, yaitu 0,5 mg/l. Namun keberadaan senyawa fenol dapat menghambat pertumbuhan mikroba. Menurut Manahan (1994), fenol merupakan racun protoplasmic yang merusak segala jenis sel. Senyawa lain yang juga menghambat kinerja mikroba adalah formaldehida, yang meskipun data konsentrasinya tidak ada dalam penelitian ini karena keterbatasan data, namun diduga memberi efek toksik terhadap mikroba .

4.4. Model Persamaan Kinetika Laju Biodegradasi

Dalam penyusunan model persamaan pendugaan laju biodegradasi disamping pengamatan COD juga dilakukan pengamatan MLVSS. Hasil penghitungan dari penyusunan model diperoleh data laju biodegradasi limbah (R_s) sebagaimana pada Tabel 15.

Selanjutnya dari data pada Tabel 15 akan ditentukan nilai k dan K dengan melakukan penghitungan nilai ρ , nilai X_v/ρ , nilai $1/\rho$ dan nilai $1/Se$. Hasil penghitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 16. Nilai ρ dapat dihitung dengan rumus :

$$r_s = -\frac{Q(S_o - QSe)}{V} = -\frac{(S_o - Se)}{\theta d} = -\rho \quad (2.3)$$

dimana:

ρ : laju pengolahan limbah (mg/l.hari)

S_o : konsentrasi COD influen (mg O_2 /l)

S_e : konsentrasi COD efluen (mg O_2 /l)

θd : waktu tinggal (hari)

Tabel 15. Data penyusunan model persamaan laju biodegradasi

No. Pengamatan	COD influen (So) (mg/l)	COD efluen (Se) (mg/l)	θ_d (hari)	Xv (VSS)
1	1516	481	4	1830
2	1422	443	4	2340
3	1537	442	4	2200
4	1517	442	4	2370
5	1531	412	4	2550
6	1457	389	4	2830
7	1387	436	4	2150
8	1324	415	4	2340
9	1243	474	3	1980
10	1202	465	3	2240
11	1471	607	2	1800
12	1431	530	2	2600

Model kinetika laju biodegradasi limbah dalam reaktor anaerob ditentukan dengan menguji persamaan laju biodegradasi limbah . Persamaan tersebut dipilih dengan menguji nilai R^2 dari persamaan (2.9) dan (2.10) yaitu :

$$\frac{Xv}{\rho} = \frac{Xv\theta_d}{(S_o - S_e)} = \frac{K}{k} \frac{1}{S_e} + \frac{1}{k} \quad (2.9)$$

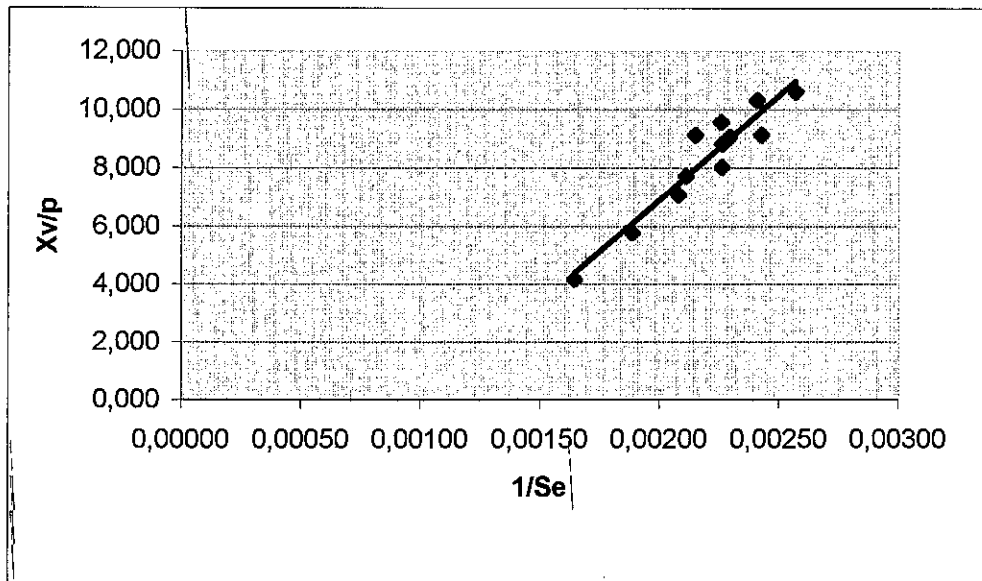
$$\frac{1}{\rho} = \frac{\theta_d}{(S_o - S_e)} = \frac{K}{k} \frac{1}{S_e} + \frac{1}{k} \quad (2.10)$$

Tabel 16. Hasil penghitungan nilai ρ , X_v/ρ , $1/\rho$ dan $1/Se$

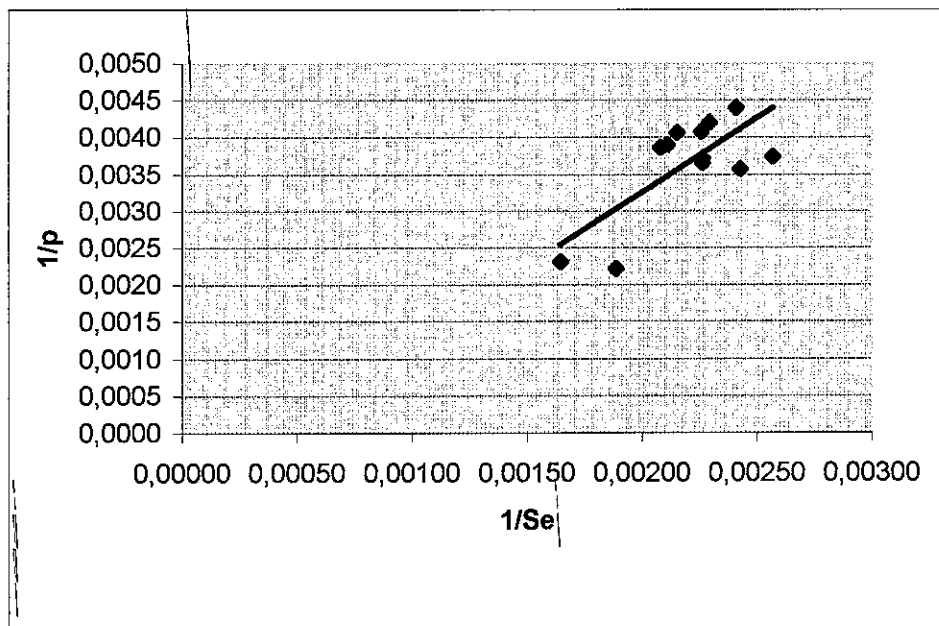
No. Pengamatan	ρ	X_v/ρ	$1/\rho$	$1/Se$
1	258,7500	7,072	0,0039	0,00208
2	244,7500	9,561	0,0041	0,00226
3	273,7500	8,037	0,0037	0,00226
4	268,7500	8,819	0,0037	0,00226
5	279,7500	9,115	0,0036	0,00243
6	267,0000	10,599	0,0037	0,00257
7	237,7500	9,043	0,0042	0,00229
8	227,2500	10,297	0,0044	0,00241
9	256,3333	7,724	0,0039	0,00211
10	245,6667	9,118	0,0041	0,00215
11	432,0000	4,167	0,0023	0,00165
12	450,5000	5,771	0,0022	0,00189

Dari hasil plot data antara nilai X_v/ρ pada sumbu y dengan nilai $1/Se$ pada sumbu x. untuk persamaan (2.9) diperoleh koefisien determinasi atau nilai R^2 untuk persamaan (2.9) sebesar 0,89. Ini berarti 89 % variasi nilai X_v/ρ dapat dijelaskan oleh variasi nilai $1/Se$, sedangkan sisanya (11 %) disebabkan oleh faktor lain. Sedangkan hasil plot data antara nilai $1/\rho$ pada sumbu y dengan nilai $1/Se$ pada sumbu x dari persamaan (2.10) diperoleh nilai R^2 untuk persamaan (2.10) sebesar 0,52. Dengan demikian persamaan (2.9) dipilih sebagai model laju biodegradasi limbah karena nilai R^2 nya lebih tinggi daripada persamaan (2.10). Plot data antara nilai X_v/ρ pada sumbu y dengan nilai $1/Se$ pada sumbu x. dari

persamaan (2.9) dapat dilihat pada Gambar 14, sedangkan plot data antara nilai $1/\rho$ pada sumbu y dengan nilai $1/Se$ pada sumbu x dari persamaan (2.10) dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 14. Grafik plot antara nilai Xv/p dan $1/Se$



Gambar 15. Grafik plot antara nilai $1/p$ dan $1/Se$

Dari persamaan (2.9) yang terpilih ini diperoleh nilai intersep sebesar 7,4115, sehingga nilai k dapat dihitung sebagai berikut :

$$k = 1 / (7,412) = 0,135.$$

Selanjutnya dari nilai koefisien persamaan sebesar 7141,941 dapat dihitung nilai K = (0,135) (7141,941) = 963,621. Dengan demikian dapat disusun model persamaan laju biodegradasi limbah (3.6) sebagai berikut :

$$rs = -\frac{Q(S_o - QSe)}{V} = -\frac{(S_o - Se)}{\theta d} = -\rho = -\frac{kX_v Se}{K + Se} \quad (3.6)$$

$$rs = -\rho = -\frac{(0,135)X_v Se}{(963,621) + Se} = -\frac{0,135X_v Se}{963,621 + Se} \quad (3.7)$$

Hasil perhitungan nilai rs dengan model persamaan laju biodegradasi limbah (3.7) dapat dilihat pada Tabel 17.

Tabel 17. Hasil perhitungan nilai rs dengan model persamaan laju biodegradasi limbah

No. Pengamatan	COD efluen (Se) (mg/l)	Xv (VSS) (mg/l)	-rs model (mg/l.hari)
1	481	1830	246,2114
2	443	2340	268,7712
3	442	2200	251,6366
4	442	2370	271,0813
5	412	2550	257,0737
6	389	2830	258,5827
7	436	2150	239,8181
8	415	2340	238,9212
9	474	1980	258,7588
10	465	2240	281,9901
11	607	1800	413,7461
12	530	2600	429,0508

Persamaan laju biodegradasi limbah yang telah disusun selanjutnya diuji validitasnya menggunakan data observasi sebagaimana pada Tabel 18.

Tabel 18. Data pengujian validitas model persamaan laju biodegradasi limbah secara anaerob.

Pengamatan	COD influen So (mg/l)	COD efluen Se (mg/l)	VSS Xv (mg/l)	θ_d (hari)	-rs observasi (mg/l.hari)
1	1477	480	1910	4	237,9815
2	1480	464	2430	4	279,3103
3	1516	460	2280	4	256,8762
4	1512	440	2610	4	266,2401
5	1539	429	2690	4	259,9019
6	1489	406	2970	4	256,2712
7	1366	435	2310	4	229,8889
8	1361	454	2260	4	247,1165
9	1172	449	2350	3	250,6488
10	1227	479	2320	3	287,6039
11	1429	513	2670	2	394,4932
12	1571	589	2020	2	458,2819

Selanjutnya persamaan (3.7) diuji validitasnya dengan data observasi pada Tabel 18. Dari hasil uji statistik χ^2 dengan menggunakan persamaan (3.5) didapatkan bahwa nilai χ^2 sebesar 4,88, sedangkan nilai χ^2 kritis (11;0,05) adalah 19,68. Ini berarti persamaan (3.7) dapat dipakai sebagai model pendugaan laju biodegradasi limbah cair pada reaktor anaerob. Dengan disusunnya

persamaan tersebut dapat dilakukan pendugaan laju biodegradasi limbah pada setiap nilai efluen dan VSS yang terukur. Data hasil penghitungan nilai χ^2 perbandingan antara nilai rs model dengan rs observasi dapat dilihat pada Tabel 19.

Tabel 19. Data perhitungan nilai χ^2 antara nilai rs model dengan rs observasi

Pengamatan	-rs model (mg/l.hari)	-rs observasi (mg/l.hari)	χ^2
1	246,2114	237,9815	0,27509
2	268,7712	279,3103	0,41327
3	251,6366	256,8762	0,10910
4	271,0813	266,2401	0,08646
5	257,0737	259,9019	0,03112
6	258,5827	256,2712	0,02066
7	239,8181	229,8889	0,41111
8	238,9212	247,1165	0,28111
9	258,7588	250,6488	0,25418
10	281,9901	287,6039	0,11176
11	413,7461	394,4932	0,89590
12	429,0508	458,2819	1,99151
Jumlah			4,88125

4.5. Perbandingan Kinerja dengan Target Perusahaan

Target perusahaan untuk efisiensi penurunan COD melalui proses anaerob sebesar 60 %. Hal ini berarti apabila konsentrasi COD influen sebesar 1500 mg/l, maka dengan efisiensi pengolahan 60 % dapat dihasilkan nilai konsentrasi COD effluen sebesar 600 mg/l. Namun kenyataannya berdasarkan laporan analisa harian yang dilakukan oleh PT Rimba Partikel Indonesia menunjukkan bahwa target efisiensi 60 % untuk reaktor anaerob IPAL sulit dicapai, sebagaimana data pada Lampiran 8. Data pada lampiran 8 menunjukkan bahwa konsentrasi COD effluen rata-rata dari reaktor anaerob IPAL PT.Rimba Partikel Indonesia sebesar 921 mg/l.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nutrien dengan rasio COD:P=300:1 dengan proses kontinyu pada waktu tinggal 4 hari dapat mencapai efisiensi rata-rata sebesar 70,88 % atau lebih tinggi 10,88 % dari target perusahaan. Dengan perlakuan tersebut konsentrasi effluen dari reaktor anaerob dapat lebih rendah untuk pengolahan selanjutnya melalui proses aerob. Efisiensi yang lebih tinggi pada hasil penelitian dibandingkan dengan kinerja reaktor pada IPAL di industri dipengaruhi oleh pengoperasian IPAL yang belum sesuai dengan kebutuhan hidup bakteri.

Pengaliran influen limbah yang tidak kontinyu di industri dari bak ekualisasi menuju reaktor anaerob mempengaruhi rendahnya efisiensi dalam proses anaerob. Pengaliran dilakukan pada sore hari (sekitar pk 15.00) hingga keesokan paginya (sekitar pk 8.00). Selanjutnya pada jam kerja aliran tersebut dihentikan dan berganti dengan pengaliran supernatant dari bak anaerob ke bak semi aerob dan bak aerob. Penghentian aliran limbah menuju ke bak anaerob menyebabkan terhentinya pasokan senyawa organik yang merupakan sumber karbon, sumber aseptor elektron, dan sumber berbagai mineral yang dibutuhkan

oleh mikroba untuk kehidupannya. Hal ini mengakibatkan proses pengolahan menjadi tidak optimal, sehingga efisiensinya rendah.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah mengenai pengendalian kecepatan aliran (*flow rate*) influen limbah menuju bak anaerob. Industri tidak memiliki flowmeter sehingga kecepatan aliran yang berubah-ubah menyebabkan waktu tinggal proses tidak dapat dikendalikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu tinggal berpengaruh nyata terhadap efisiensi proses pengolahan, karena berkaitan dengan kesempatan kontak antara mikroba dengan limbah.

Perlakuan pendahuluan sebelum pengolahan secara anaerob di industri dilakukan secara fisika dengan proses filtrasi. Kurang sempurnanya proses filtrasi menyebabkan terikutnya partikel-partikel kayu yang cukup besar ke bak anaerob yang dapat meningkatkan COD influen limbah, sehingga konsentrasi influen terlalu tinggi untuk mikroba anaerob yang ada. Hal ini juga dapat mempengaruhi efisiensi penurunan COD.

Perubahan kondisi dalam proses kontinyu sangat mempengaruhi efisiensi reaktor. Perubahan kondisi tersebut dapat diakibatkan oleh perubahan variasi perlakuan (misalnya konsentrasi influen yang terlalu tinggi) maupun hambatan teknis operasional (misalnya aliran tersumbat, perubahan pH, dll). Hal tersebut mengakibatkan kesetimbangan ekologis untuk kehidupan mikroba menjadi terganggu, sehingga diperlukan waktu yang cukup panjang untuk mencapai kondisi tunak. Untuk itu disarankan agar kondisi reaktor anaerob dihindari dari perubahan yang cukup besar fluktuasinya, seperti perubahan konsentrasi influen, penghentian aliran influen limbah, perubahan pH, temperatur dan sebagainya.

Hasil pengamatan pada reaktor anaerob yang terbuat dari kaca di laboratorium menunjukkan bahwa rendahnya efisiensi reaktor anaerob juga dapat

dipengaruhi oleh terjadinya *channelling* dalam reaktor, dimana terjadi ruang kosong (seperti terowongan) dalam *sludge blanket* yang menyebabkan kontak mikroba dengan lumpur menjadi berkurang. Hal ini mungkin saja dapat terjadi dalam bak anaerob di industri, namun sulit diamati karena bak terbuat dari beton dengan kondisi *sludge* yang berwarna hitam. *Channelling* terjadi karena ketidaksempurnaan pembuatan alat dimana posisi pembagi (*baffle*) pada reaktor tidak sama sehingga ketinggian atau kepadatan *sludge* tidak sama. Akibatnya tahanan friksi tidak sama sehingga aliran mencari tempat yang kepadatannya lebih rendah. Dengan demikian fluidisasi *sludge* di sepanjang aliran kurang merata. Untuk mengatasi atau mencegah terjadinya *channeling* sesekali perlu dilakukan pengadukan *sludge*.

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab-bab terdahulu dapat disimpulkan bahwa :

1. Efisiensi penurunan COD berbeda nyata antara variasi waktu tinggal 2 hari, 3 hari dan 4 hari pada tingkat signifikansi 95 %. Rata-rata efisiensi penurunan COD pada variasi waktu tinggal 4 hari sebesar 65,22 %, sedangkan waktu tinggal 3 hari sebesar 58,68 % dan 2 hari sebesar 57,75 % pada tingkat signifikansi 95 %. Semakin lama waktu tinggal mempengaruhi kesempatan kontak yang lebih besar antara mikroba anaerob dengan substrat, sehingga degradasi limbah organik meningkat.
2. Efisiensi penurunan COD pada waktu tinggal 4 hari dengan berbagai variasi nutrisi yaitu rasio COD:P=300:1, 200:1, 100:1 dan kontrol (tidak diberi penambahan nutrisi) berbeda nyata pada tingkat kepercayaan 90 %. Variasi rasio COD:P=300:1 menghasilkan efisiensi rata-rata tertinggi yaitu 70,88 %, sedangkan pada rasio 200:1 sebesar 67,53 %, pada rasio 100:1 sebesar 65,75 % dan kontrol sebesar 65,22 %. Meskipun efisiensi penurunan COD pada rasio 300:1 tidak berbeda nyata dengan rasio 200:1 pada tingkat signifikansi 90 %, namun dari segi efisiensi operasional dan biaya rasio COD:P= 300:1 merupakan kondisi terbaik untuk operasional reaktor anaerob di PT. Rimba Partikel Indonesia. Penambahan nutrisi dengan rasio COD:P= 300:1 dapat meningkatkan efisiensi penurunan COD sebesar 10,88 % dari target perusahaan yang sebesar 60 %.

3. Model persamaan yang telah diverifikasi dan divalidasi untuk kinetika laju biodegradasi limbah dalam reaktor anaerob adalah sebagai berikut :

$$rs = -\rho = -\frac{0,135X_vSe}{963,621 + Se}$$

dimana :

rs : laju biodegradasi limbah (mg/l.hari)

X_v : MLVSS

Se : konsentrasi COD efluen (mg O_2 /l)

5.2. Saran

Hasil penelitian ini dapat memberi rekomendasi bagi PT. Rimba Partikel Indonesia untuk mengoptimalkan efisiensi dalam pengoperasian reaktor anaerob untuk pengolahan limbah cairnya sebagai berikut :

1. Waktu tinggal 4 hari disertai pemberian nutrisi dengan rasio COD:P=300:1 dapat menghasilkan peningkatan efisiensi penurunan COD yang cukup berarti, yaitu 10,88 % lebih tinggi dari target perusahaan selama ini sebesar 60 %. Dengan waktu tinggal yang lebih lama tersebut terdapat beberapa alternatif dalam operasional reaktor anaerob yaitu memperbesar volume bak anaerob, meminimalkan volume limbah yang terbuang per hari dari tanki sehingga waktu tinggal 4 hari dapat dicapai, atau meminimalkan beban limbah dengan cara membersihkan tanki glue dengan bahan (kertas atau kain) penyerap, baru kemudian dilakukan pencucian tanki.
2. Perubahan kondisi dalam proses kontinyu sangat mempengaruhi efisiensi reaktor. Hal tersebut menyebabkan kesetimbangan ekologis untuk kehidupan mikroba menjadi terganggu, sehingga diperlukan waktu yang

- cukup panjang untuk mencapai kondisi tunak. Untuk itu disarankan agar perusahaan menjaga kondisi reaktor anaerob dari perubahan-perubahan yang cukup besar misalnya penghentian pengaliran limbah menuju reaktor anaerob, perubahan konsentrasi influen, pH, temperatur dan sebagainya
3. Untuk melengkapi informasi mengenai kinerja terbaik bagi reaktor anaerob IPAL PT Rimba Partikel Indonesia perlu diteliti jenis dan karakteristik mikroba yang berperan dalam biodegradasi limbah secara anaerob.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaerts, G dan Santika, SS. 1984. *Metode Penelitian Air*. Usaha Nasional. Surabaya.
- Andrews, J.F. 1989. *Dynamic Modeling and Expert Systems in Wastewater Engineering*. Lewis Publishers, Inc. Chelsea.
- Astuti, AD dan Asis H Djajadiningrat. 2000. *Model Matematika Penyisihan Substrat Dalam Bioreaktor Hibrid Anaerobik Yang Mengolah Air Buangan Mengandung Bahan Organik Tinggi*. Jurnal Purifikasi Vol 1 No.3, Mei 2000. Surabaya.
- APHA,AWWA,WPCF. 1995. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. Washington.
- Chariton, AP dan Wahyono Hadi. 2000. *Studi Pertumbuhan Bed Lumpur Kaitannya dengan Produksi Biogas pada Pengolahan Air Limbah Pabrik Tahu dengan Reaktor Anaerobik Aliran Horizontal*. Jurnal Purifikasi Vol 1 No.5 September 2000. Surabaya.
- Dajan, A. 1996. *Pengantar Metode Statistik Jilid II*. PT Pustaka LP3ES. Jakarta.
- Dalemo, M.I, et al. *Environmental Impact of NPK-fertilizer Versus Anaerobic Digestion Residue or Compost – A system Analysis*. Stockholm.
- Damanhuri, E. 2001. *Sludge Treatment*. Bahan Pelatihan Pengelolaan Limbah Cair Industri. Pusdiklat BAPEDAL. Serpong.
- Droste, R. 1997. *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*. John Wiley and Sons. Canada.
- Eckenfelder, W.W. 2000. *Industrial Water Pollution Control 3rd Edition, International Edition*. Mc Graw-Hill Higher Education. Singapore.
- Hendarko, S et al. 2002. *Mikrobiologi Dasar*. Jurusan Biologi Fakultas MIPA Universitas Diponegoro. Semarang.
- Hermana, J dan B.V Tangahu. 2000. *Nitrogen Immobilization During The Anaerobic Treatment of Sulphate and Organic N-Rich Wastewater*. Jurnal Purifikasi Vol. 1 No.2 Maret 2000:61-66. Surabaya.
- Jorgensen. S.E. 1994. *Fundamentals of Ecological Modelling (2nd Edition)*. Elsevier Science B.V. Netherlands.
- Manahan, SE. 1994. *Environmental Chemistry 6 ed*. CRC Press, Florida.

- Mardisiswoyo, P, et al. _____. *Petunjuk Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran Limbah Padat dan Cair Industri*. Departemen Perindustrian. Jakarta
- Marpaung, R dan Anwar Basuki. 2001. *Pengolahan Lumpur Biologis dengan Proses Anaerob Digestion*. Laporan Penelitian Mahasiswa Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro. Semarang.
- Mas'ari A dan Ekowati. 2000. *Pemodelan Matematis Pengolahan Air Limbah Dengan Berbagai Jenis Reaktor Biologi*. Laporan Penelitian Mahasiswa. Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Tidak Dipublikasikan. Semarang
- Reynolds, TD. 1982. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Brooks/ Cole Engineering Division. Monterey, California.
- Setiadi, Tj. 2001. *Pengolahan Limbah Cair Secara Sekunder (Biologi)*. Bahan Pelatihan Pengelolaan Limbah Cair Industri. Pusdiklat BAPEDAL. Serpong.
- Steel, RGD dan J.H.Torrie. 1993. *Prinsip dan Prosedur Statistik*. Terjemahan dari Principles and Procedures of Statistics, oleh Bambang Sumantri. Penerbit PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta
- Sundstrom, D.W dan Herbert E. Klei. 1979. *Wastewater Treatment*. Prentice Hall, Inc. New York.
- Supranto, J. 2001. *Statistik Teori dan Aplikasi Jilid I Edisi keenam*. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Supranto, J. 2001. *Statistik Teori dan Aplikasi Jilid II Edisi keenam*. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Sutigno, P dan A. Santoso. 1996. *Pengaruh Penambahan Urea dan Melamin pada Perekat Urea Formaldehida Terhadap Emisi Formaldehida dan Sifat-Sifat Fisis-Mekanis Papan Partikel*. Buletin Penelitian Hasil Hutan Vol 4 (5) : 178-191.
- Tangahu, BV dan Sarwoko Mangkoediharjo. 2000. *Ecotoxicity of Tempe Waste to Cyprinus carpio and COD Removal in Anaerobic Filter*. Jurnal Purifikasi Vol. 1 No. 2 Maret 2000 : 67-72. Surabaya.
- Vavilin, V.A, et al. 2000. *The <Methane> Simulation Model As The First Generic User-Friend Model of Anaerobic Digestion*. Vestnik Moskovskogo Universiteta, Khimiya, Vol 41 No.6 Supplement.
- Watts,R.J. 1998. *Hazardous Wastes*. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Yuliati, S dan Sarwoko Mangkoedihardjo. 2001. *Penurunan COD Limbah Tempe dengan Anaerobic Horizontal Baffled Reactor serta Ekotoksisitasnya Terhadap Oryza sativa dan Phaseolus radiatus*. Jurnal Purifikasi Vol 2 No.3, Mei 2001. Surabaya.

Yustikarini, RT dan Gogh Yoedihanto. 2000. *Studi Kinerja Anaerobic Radial Mixing Reactor Terhadap Penurunan Kandungan COD dan SS Influen IPLT Sukolilo, Surabaya*. Jurnal Purifikasi Vol. 1 No. 3 Mei 2000. Surabaya.